Ferdowsi Civil Engineering, 37, 2, 2024. (1-24)

Ferdowsi University of Mashhad

Ferdowsi Civil Engineering

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir

Iranian Concrete Institute

Pavement Engineering Association of Iran

Effect of Nano-Cement Particles on the Geotechnical Properties of Dune Sand-Bentonite Mixtures *

Research Article

Reza Parvaresh[1], Rouzbeh Dabiri[2], Saeideh Ebrahimi Asl[3]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.82076.1225

1- Introduction

Enhancing the engineering performance of problematic soils in construction projects is a key focus in geotechnical engineering. A critical consideration in designing geotechnical structures and buildings on soft or loose soils is the extent of deformation or settlement, as well as their resistance in some cases. Although soil stabilization methods are typically categorized as mechanical or chemical, nano-materials are now being used more frequently to improve the geotechnical properties of soils. In addition, the way soil particles are skeleton and arranged, along with their size, plays a role in determining the void ratio and the contact points between particles, which in turn affects the selection of stabilization methods. This is particularly relevant when the soil is a mix of coarse and fine particles, a scenario often encountered in engineering projects. In this study, an attempt was made to examine the effectiveness of nanoparticles (specifically nano-cement) in stabilizing a sand-clay mixed soil (bentonite) and modifying its skeleton and framework. Improving the geotechnical properties of the stabilized soil makes it feasible to stabilize soil beneath foundations, construct embankments behind retaining walls, and build road pavement layers.

2- Materials and Experimental Program

For this purpose, nano-cement particles were added into sand-bentonite mixtures at weight percentages of 0.2%, 0.4%, and 0.6%, with the bentonite content set at 15%, 30%, and 60%. The samples were then cured and tested at intervals of 7, 14, and 28 days. To assess the geotechnical properties of the improved stabilized specimens, a series of tests were performed according to the ASTM standards, including compaction (ASTM D698), uniaxial strength (ASTM D2166), direct shear under dry and saturated conditions (ASTM D3080-11), and the California Bearing Ratio (CBR) test (ASTM D1883). The sand used in this study was dune sand prepared from the Shore of Urmia Lake, specifically the fraction that passed through sieve sizes 40 and 50. Sodium bentonite was chosen as the clay component. According to the Unified Soil Classification System, the used sand is classified as type SP, indicating a uniform grain size, while the bentonite is classified as type CH, indicating high plasticity. The grain size distribution of dune sand and bentonite can be seen in Figure 1. The physical and geotechnical properties of materials are presented in Table 1.

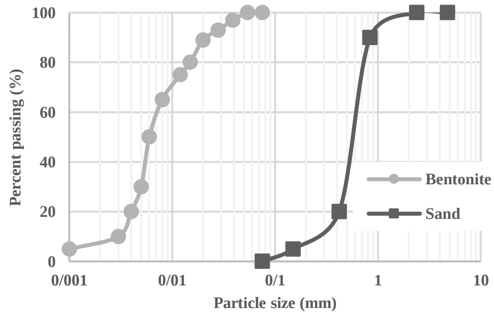


Figure 1. Grain size distribution of materials used in this study

Table 1. Physical and geotechnical properties of materials

Geotechnical properties	Bentonite	Dune sand
PI	57	0
Gs	2.75	2.65
(φ)	20	35
C (kG/cm2)	0.72	0.04
γ_{dmax} (gr/cm3)	1.38	1.64
e_{min}	0.72	0.6

3- Results

The findings of the present research suggest that the best approach is to add 0.6% nano-cement to dune sand containing 15% bentonite, with a 28-day curing time. The reasons for this recommendation are as follows:

*Manuscript received April 22, 2023, Revised November March 3, 2024, Accepted April 27, 2024.

[1] M.Sc. of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.
[2] Corresponding author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.
Email: rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir
[3] Associate Professor, Department of Chemistry Engineering, Ahar Branch, Islamic Azad University, Ahar, Iran.

1- During the 28-day curing period, the maximum dry density of the dune sand+15% bentonite mixture with 0.6% nano-cement rose by 21%, while the optimum water content dropped by 51% (Figures 2 and 3).

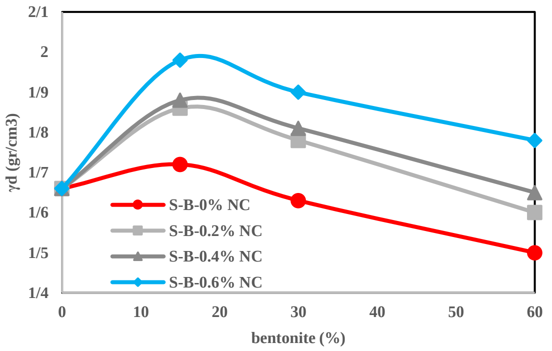


Figure 2. The effect of Nano cement particles on the maximum dry density of dune sand-bentonite mixture during the 28-day curing period.

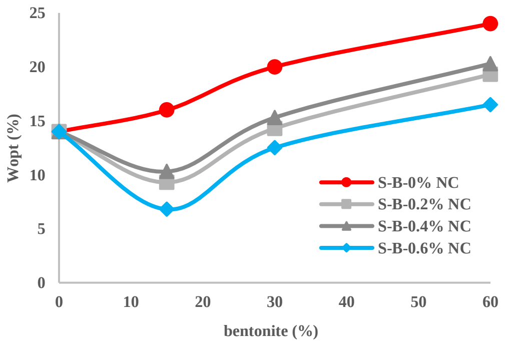


Figure 3. Effect of nano-cement particles on the optimum water content of dune sand-bentonite mixture during the 28-day curing period

2- After a 28-day curing period, the uniaxial compressive strength increased by 1.8 times, and the secant modulus (E_{50}) showed a 1.94-fold improvement under the same conditions. However, the addition of 0.6% nano-cement to dune sand with 15% bentonite caused the material to become harder and more brittle, reducing the shear strain at failure by 33% during the same curing period.
3- In dry loading conditions, the internal friction angle in a dune sand containing 15% bentonite and 0.6% nano-cement sample augmented by 9%. However, in a saturated state, extending the curing time did not significantly influence the effect of nano-cement in the dune sand-bentonite mixture. Moreover, the internal friction angle decreased as the amount of nano-cement and bentonite in the dune sandy soil increased (Figures 4 and 5).
4- In both dry and saturated loading conditions with a 28-day curing period, cohesion in the tested samples increased with the addition of nano-cement. However, the highest cohesion was observed in the sample containing a dune sand-bentonite mixture with 0.6% nano-cement. The growth rates for cohesion in dry and saturated conditions were 1.1 and 12.1, respectively.
5- In dry loading conditions, the shear strength in dune sand samples with 15% bentonite and 0.6% nano-cement increased by an average of 52.5% over a 28-day curing period regardless of vertical stress levels. In saturated loading conditions, shear strength rose in dune sand samples with 30% bentonite after a 28-day curing period. In these cases, the bearing capacity grew by 40.7% across all levels of vertical stress.
6- After 28 days of curing, the mixture of dune sand with 15% bentonite and 0.6% nano-cement achieved the highest California Bearing Ratio (CBR). According to Code No. 234, this mixture is suitable for constructing all layers of pavement, with a particular focus on the base layer. This suggests that in regions where roads pass fine-grained soil with high plasticity, nano-cement can be utilized to stabilize the soil and build pavement layers (Figure 4).

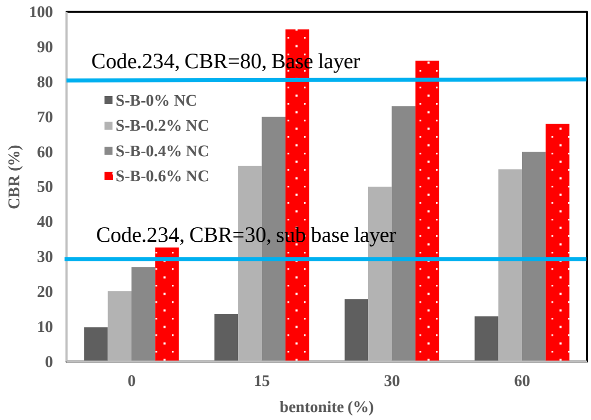


Figure 4. Effect of nano-cement particles on the results of the California Bearing Ratio (CBR) test for the studied samples in their dry state subjected to 56 blows of compressive energy per layer during a 28-day curing period

4- Conclusion

The findings of the current research suggest that when dune sand soil contains more than 15% bentonite, its skeleton structure weakens due to the large void ratio between particles. However, when nano-cement is added and the curing period is extended to 28 days, cementation reactions among the soil particles lead to the formation of new granular structures, strengthening the skeleton framework. This phenomenon is especially evident in the mixtures of dune sand with 15% bentonite and 0.6% nano-cement. This process suggests that friction and contact surfaces between particles have increased, resulting in higher bearing capacity and a reduced risk of settlement or deformation among the soil particles. As a result, a mixture of dune sand with 15% bentonite and 0.6% nano-cement is suitable for constructing geotechnical structures and road pavement layers. It should be noted that this study did not examine the effect of nano-cement on the swelling properties and volume increase of bentonite in fully saturated conditions, which will be addressed in future research.

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

انجمن مهندسی روسازی ایران

انجمن بتن ایران

تأثیر ذرات نانو سیمان بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی مخلوط ماسه بادی- بنتونیت*

مقاله پژوهشی

رضا پرورش[۱]   روزبه دبیری[۲]   سعیده ابراهیمی اصل[۳]

DOI: 10.22067/jfcei.2024.82076.1225

چکیده *بهبود رفتار مهندسی خاک‌های مسأله‌دار در پروژه‌های عمرانی به عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل پیشرو در مهندسی ژئوتکنیک محسوب می‌شود. عامل مهم و تعیین کننده در طراحی سازه‌ها و ابنیه‌های ژئوتکنیکی بر روی خاک‌های نرم و سست، تغییر شکل پذیری یا نشست و گاهی مقاومت آنها می‌باشد. اگرچه روشهای تثبیت خاکها عموما به دو بخش مکانیکی و شیمیایی تقسیم می‌شوند ولی امروزه از مواد به اندازه نانو جهت بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی خاکها استفاده می‌گردد. هدف اصلی از تحقیق حاضر، امکان کاربرد ذرات نانو سیمان در جهت بهسازی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مخلوط ماسه بادی-بنتونیت (به میزان ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درصد) است. برای این منظور، ذرات نانو سیمان به مقدار ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد وزنی به خاک مورد مطالعه افزوده شده و به مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل آوری بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است. جهت انجام تحقیق از آزمون‌های آزمایشگاهی تراکم، تک محوری، برش مستقیم (در دو حالت خشک و اشباع) و نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) براساس استاندارد ASTM استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان داده است حالت بهینه، ترکیب ۰/۶ درصد نانو سیمان در مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه در خاک مخلوط ماسه بادی به همراه ۱۵ درصد بنتونیت می‌باشد. زیرا، این شرایط باعث بهبود خصوصیات تراکم پذیری، افزایش توان باربری و مقاومت برشی در مصالح بهسازی شده گردیده است.*

واژه‌های کلیدی ماسه بادی، رس، بنتونیت، نانو سیمان، بهسازی خاک.

Effect of Nano Cement Particles on Geotechnical Properties of Dune Sand-Bentonite Mixtures

Reza Parvaresh   Rouzbeh Dabiri   Saeideh Ebrahimi Asl

Abstract *Improving the engineering behavior of problematic soils in civil engineering projects is considered as one of the most important issues in geotechnical engineering. The important and decisive factor in the design of geotechnical structures and buildings on soft and loose soils is their deformation or settlement and resistance. One of the types of soft soil is a mixture of dune sand with clay (Bentonite). Although soil stabilization are generally divided to mechanical and chemical methods, nowadays Nano materials are used to improve the geotechnical properties of soils. The main idea of present research is the possibility of using Nano cement particles to improve the geotechnical properties of dune sand-bentonite (at the 15, 30 and 60 percentage) mixture. In order to perform the research, uniaxial compression, direct shear (in both dry and saturated states) and California load bearing ratio (CBR) laboratory tests have been used based on the ASTM standard. The obtained results have shown that the optimal condition is the combination of 0.6 % Nano cement in dune sand with 15% bentonite with 28-day curing period. Because, these conditions have improved compressibility characteristics, increased bearing capacity and shear resistance in stabilized materials.*

Key words Dune sand, Clay, Bentonite, Nano cement, Soil Improvement.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۲/۲/۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۳/۲/۷ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.

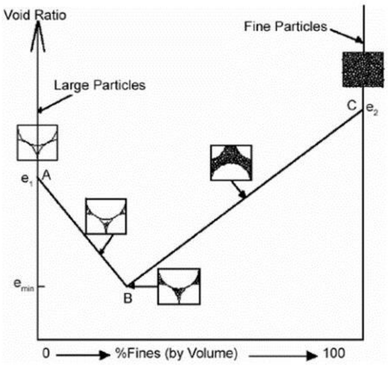
(۲) نویسنده مسئول، دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.

(۳) دانشیار، گروه شیمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر.

Email: rouzbeh_dabiri@iaut.ac.ir

مقدمه

با گسترش روز افزون فعالیت‌های عمرانی و ساختمانی، یکی از چالش‌های مهم در پروژه‌های عمرانی، حضور بسترها و لایه‌های خاکی نرم در محل اجرای سازه‌ها و ابنیه‌های ژئوتکنیکی است. یکی از انواع خاک‌های مساله دار، خاک‌های نرم همچون ماسه بادی و رس می‌باشد. خاک‌های ماسه‌ای بادی بدلیل دانه‌بندی یکنواخت دارای توانایی برابری مناسب نبوده و خاک‌های رسی به دلیل کاهش شدید مقاومت و قابلیت افزایش حجم در اثر جذب آب می‌تواند آسیب‌های جبران ناپذیری بر روی سازه‌ها و ابنیه‌های ژئوتکنیکی بوجود آورد. در حالت کلی روش‌های مختلف مکانیکی و شیمیایی جهت بهسازی خصوصیات خاک‌ها موجود است و انتخاب نوع روش بستگی به اثرگذاری آن برخصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک مورد مطالعه در جهت رسیدن به اهداف تثبیت دارد. امروزه کاربرد نانو مواد جهت تثبیت، بهسازی و کاربرد در مسائل ژئوتکنیکی پیشنهاد شده و مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام یافته است. از سوی دیگر، اضافه شدن رس یا لای به ماسه در درصدهای مختلف می‌تواند بطور اساسی رفتار ماتریس ماسه و رس را تغییر دهد. مطابق شکل(۱) تغییرات درصد نسبت تخلخل برحسب درصد ریزدانه قابل مشاهده است. در قسمت A درصد ریزدانه صفر است و دانه‌های ماسه بخوبی با یکدیگر تماس دارند و می‌توانند نیرو را منتقل کنند. هنگامیکه از نقطه A به نقطه B میزان درصد ریزدانه افزایش می‌یابد، در این حالت ریزدانه‌ها فضای خالی بین دانه‌های ماسه را پر می‌کنند و باعث کاهش نسبت تخلخل و دانسیته نسبی می‌شوند بدون آنکه در باربری شرکت داشته باشند تا اینکه در نقطه B ریزدانه‌های اضافه شده کاملا فضای خالی بین دانه‌های ماسه‌ای را پر می‌کنند. به این مقدار ریزدانه، ریزدانه حدی می‌گویند. با افزایش مقدار ریزدانه و رسیدن به نقطه C، مشاهده می‌گردد دانه‌های ماسه بیشتر از یکدیگر جدا می‌شوند و ذرات ریزدانه نقش مهمتری را ایفا می‌کنند تا اینکه در نقطه C ریزدانه‌ها نمونه را تشکیل می‌دهند. قابل ذکر است مقدار حدی ریزدانه به دانه بندی خاک اصلی و خصوصیات ریزدانه بستگی دارد. بطور مثال خاک‌های خوب دانه بندی شده در مقایسه با خاکهای بد دانه بندی شده نسبت تخلخل کمتری دارند و در نتیجه مقدار کمتری ریزدانه می‌تواند دانه‌های ماسه را کاملا از هم جدا کند. همچنین ذرات رس نسبت به ذرات لای دارای نسبت تخلخل بیشتری هستند و می‌توانند به صورت مؤثرتری در پر کردن فضای خالی بین دانه‌های ماسه شرکت کنند [1].



شکل ۱ تغییرات نسبت تخلخل مخلوط ماسه و رس برحسب تغییرات درصد رس [1]

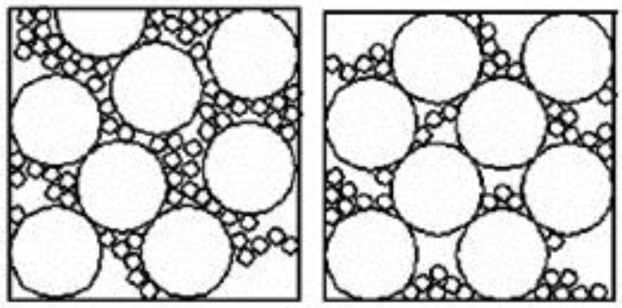
در حالتیکه ریزدانه‌ها به طور فعال در باربری نقشی ندارند و کاملا در فضاهای خالی بین دانه‌های ماسه قرار گرفته‌اند و نسبت تخلخل کلی نمونه را کاهش می‌دهند با افزایش مقدار ریزدانه به تدریج ذرات رس تعدادی از دانه‌های ماسه را نیز از هم جدا می‌کنند. این موضوع در شکل (۲-الف) دیده می‌شود. سپس با در نظر گرفتن حجم دانه های ریز (fc) به عنوان فضای خالی می‌توان نسبت تخلخل دانه‌ای (e_s) درشت را بصورت زیر تعیین نمود.

$$e_s = \frac{e + fc}{1 - fc} \tag{۱}$$

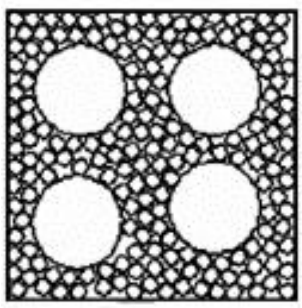
در رابطه فوق، e_s نسبت تخلخل دانه‌ای نامیده می‌شود. همچنین، درحالتیکه دانه‌های ریز فضای خالی بین دانه‌های درشت را کاملا پر کرده‌اند بطوریکه دانه‌های درشت با یکدیگر تماس ندارند. به عبارت دیگر، دانه‌های درشت به صورت غوطه ور میان دانه‌های ریز قرار دارند و نمی‌توانند با یکدیگر در باربری ماتریس نقش داشته باشند، بلکه تنها به عنوان انتقال دهنده نیرو بین دانه‌های ریز اطراف خودشان کار می‌کنند. این شرایط در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. برخلاف حالت(الف) که حجم دانه‌های ریز به عنوان فضاهای خالی در نظر گرفته شده است، در این شرایط حجم دانه‌های درشت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود و نسبت تخلخل بین دانه‌های ریز بصورت زیر تعیین می‌گردد:

$$e_f = \frac{e}{fc} \tag{۲}$$

در رابطه فوق، e_f نسبت تخلخل بین دانه‌های ریزدانه نامیده می‌شود. حال در صورتیکه ریزدانه‌های موجود در خاک از جنس رس باشند علاوه بر آنکه به عنوان پرکننده در بافت خاک عمل می‌کند، می‌تواند با القاء چسبندگی به خاک بافت آن را یکپارچه‌تر سازند.



(الف)



(ب)

شکل ۲ (الف و ب) تاثیر ریزدانه در ساختار خاک (الف)در حالتیکه درصد ریزدانه کمتر از میزان حدی است، (ب) حالتیکه درصد ریزدانه بیشتر از میزان حدی است [1]

بنابراین با توجه به موارد ذکر شده می‌توان دریافت ساختار و اسکلت ذرات خاکی به همراه اندازه ذرات بر فضای خالی و تماس بین ذرات و در ادامه در انتخاب نحوه روش تثبیت آنها موثر باشد مخصوصا اگر محیط خاکی مخلوطی از ذرات درشت دانه و ریزدانه باشد که عموما بصورت عینی در پروژه‌های مهندسی مشاهده می‌شود. بنابراین، در مطالعه حاضر سعی شده است تاثیرگذاری ذرات به اندازه نانو (بویژه نانو سیمان) در جهت تثبیت خاک مخلوط ماسه–رس و اصلاح ساختار و اسکلت آن مورد بررسی قرار گیرد تا با بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده امکان استفاده از آن در تثبیت خاک زیر پی، ساخت خاکریز پشت دیوار حائل و احداث لایه‌های روسازی راه پیشنهاد گردد.

مرور مطالعات گذشته

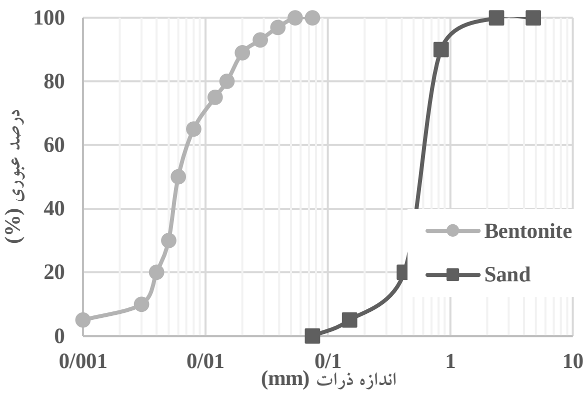
همچنان که ذکر شد، بهبود رفتار مهندسی خاک‌های مسأله‌دار در پروژه‌های عمرانی به عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل پیشرو در مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. عامل مهم و تعیین کننده در طراحی سازه‌ها بر روی خاک‌های رسی، تغییر شکل پذیری یا نشست و گاهی مقاومت آنها می‌باشد. از این رو، روش‌های مختلف فیزیکی و شیمیایی به منظور اصلاح و یا تثبیت این نوع از خاک‌ها پیشنهاد می‌گردد. مطالعات گسترده‌ای در زمینه اثر نانو ذرات در بهبود پارامترهای مقاومتی خاک صورت گرفته است. نول و همکاران در سال ۱۹۹۲ اثر نانو ذرات سیلیکا را در جهت کاهش نفوذپذیری خاک‌های ماسه‌ای مطالعه نمودند [2]. یونکورا و میوا در سال ۱۹۹۳ با تزریق ذرات نانو سیلیس مقاومت فشاری و توانایی باربری خاک ماسه‌ای را افزایش دادند [3]. مرادی و سیدی در سال ۱۳۹۵ [4]، کاکاوند و دبیری در سال ۲۰۱۸، تاثیر نانو سیلیکای کلوئیدی رو در بهبود و افزایش توانایی باربری خاک-های مخلوط ماسه- رس به ترتیب تحت شرایط بارگذاری دینامیکی و استاتیکی مطالعه نمودند [5]. در زمینه کاربرد نانو رس به منظور تثبیت خاک‌های ریزدانه، پور واحدی و همکاران [6] مشاهده نمودند با افزایش نانو رس حد روانی و حد خمیری خاک افزایش می‌یابد. همچنین بیشتر مقاومت در آزمایش ظرفیت باربری کالیفرنیا را با افزودن ۱/۵ درصد نانو رس بدست آمده بود. بهاری و همکاران [7] خواص فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک-های لای دار از نوع MH و ML تثبیت شده با نانو رس را مطالعه نمودند. نتایج بدست آمده نشان داد که نانو رس باعث افزایش حد خمیری، حد روانی، ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به میزان قابل توجهی در خاک‌های لای‌دار شده است. فخری و همکاران [8]، با افزودن نانو رس خواص هیدورلیکی خاک رس کائولینیت رو مطالعه نمودند. ایشان مشاهده کردند با افزودن ۸ ٪ نانو رس به خاک رس کائولینیت دامنه خمیری و ضریب نفوذپذیری آن در مقایسه با خاک رس کائولینیت به ترتیب ۱۸۴ درصد افزایش و ۳۰۰ برابر کاهش یافته است. عباسی و فرجاد [9]، اثر ذرات نانو رس را بر روی میزان پتانسیل واگرایی خاک‌های رسی مطالعه نمودند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان دادند افزودن نانو رس به خاک رس واگرا به طور کلی موجب کاهش پتانسیل واگرایی خاک می‌گردد. همچنین مشخص شد زمان عمل آوری نقش قابل ملاحظه‌ای در تثبیت خاک با نانو

ذرات رس داشته و برای انجام فعل انفعالات شیمیایی موردنیاز برای تثبیت حدود سه روز زمان لازم است. Taha و Taha [10] مشاهده کردند که نانو رس، وزن مخصوص خشک حداکثر خاک را تا حدودی افزایش می‌دهد. این در حالی است که رطوبت بهینه را کمی کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش مقدار نانو رس مصرفی در خاک رس، کرنش انبساطی و انقباضی خاک کاهش می‌یابد، ولی با افزایش بیشتر از حد نانو رس، باعث افزایش کرنش انبساطی و انقباضی خواهد شد. نتایج تحقیقات Mohammadi و Niazian [11] نشان داد افزودن نانو رس به خاک رسی، موجب افزایش مقاومت برشی، حد روانی و حد خمیری خاک می‌شود. سارا غفاری و دبیری در سال ۲۰۲۱ اثر نانو رس و پودر سنگ آهک را بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاکهای رسی مطالعه نمودند. ایشان دریافتند تاثیر همزمان ۵٪ نانو رس به همراه ۱۰ ٪ پودر سنگ آهک در مدت زمان عمل آوری ۷ روزه در شرایط دمای محیط به خاک رس سبب کاهش شاخص خمیری به مقدار ۷۲ ٪ ، بهبود ساختار دانه بندی و کاهش فضای خالی و افزایش مقاومت برشی به میزان ۳۳ ٪ شده است [12]. سبا غفاری و دبیری در سال ۲۰۲۱ [13] اثر ذارت نانو رس و الیاف پلی پروپیلن بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس مطالعه نمودند. ایشان در نتایج مشاهده کردند که در حالت بهینه، ترکیب ۵ درصد نانو رس به همراه ۰/۸ درصد الیاف پلی پروپیلن با مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه می باشد. زیرا این شرایط باعث بهبود شرایط تراکم پذیری، افزایش توانایی باربری، مقاومت برشی و کاهش میزان تورم و افزایش حجم در مصالح بهسازی شده گردیده است. باقری و همکاران در سال ۲۰۰۹ [14]، بررسی ویژگی‌های مکانیکی بنتونیت تثبیت شده با نانوسیلیس و سیمان را مطالعه نمود. امروزه با توسعه تکنولوژی در زمینه کاربرد ذرات نانو سیمان می‌توان مطالعات مختلفی را در راستای تثبیت خاک مشاهده نمود. چادوری و همکاران در سال ۲۰۲۳ [15] تاثیر ترکیب نانو سیلیس و نانوسیمان را بر روی خاک رس بنتونیت مطالعه کردند. ایشان دریافتند ترکیب ۰/۸ درصد نانو سیلیس به همراه ۴ درصد نانو سیمان بعد از ۲۸ روز عمل آوری میزان مقاومت کششی خاک رس بنتونیت را ۱/۰۴ برابر بهبود داده است. لیو و همکاران در سال ۲۰۲۳ [16] نیز اثرگذاری ترکیب سیمان به همران نانو سیلیس را بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ریزدانه نرم تحقیق کردند. ایشان دریافتند نسبت آب به سیمان به همراه نانو سیلیس می‌تواند بر روی مقاومت فشاری تک محوری خاک ریزدانه نرم موثر باشد و همچنین، بعد از ۷ روز مدت زمان عمل آوری، مقاومت فشاری تقریبا ۷/۳۷ درصد افزایش می‌یابد. نیرومند و همکاران در سال ۲۰۲۳ [17]، در تحقیقی تاثیر ذرات نانو سیمان را بر روی خاک رس کلاچای را مشاهده کردند. ایشان دریافتند افزودن ۷ درصد نانو سیمان به خاک مورد مطالعه مقاومت فشاری تک محوری خاک را ۲۹ برابر افزایش می دهد. نتایج حاکی از آن است که نانوسیلیس به تنهایی در مدت زمان کوتاه روی مقاومت تأثیر ندارد، اما با بکار بردن سیمان و نانوسیلیس رشد مقاومت چشمگیر خواهد شد. با مرور مطالعات گذشته مشاهده می شود در راستای تثبیت خاک‌های رسی و مخلوط ماسه–رس از ذرات نانو ذرات سیمان کمتر استفاده شده است. هدف از انجام تحقیق حاضر، امکان ارائه یک راهکار جدید جهت بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس در مخلوط ماسه –رس در راستای افزایش توانایی باربری در لایه‌های خاکی زیر پی و کاهش میزان تغییر شکل آن در ابنیه‌های ساختمانی با درنظر گرفتن اثرات ذرات نانو سیمان در ساختار و اسکلت دانه‌بندی خاک از دیدگاه تغییرات در نسبت تخلخل می‌باشد.

مواد و مصالح

همانطور که در بخش گذشته به آن اشاره گردید، هدف از مطالعه حاضر تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی خصوصیات ژئوتکنیکی مخلوط خاک ماسه–رس می‌باشد. خاک ماسه مورد مطالعه از نوع ماسه بادی بوده که از ساحل دریاچه ارومیه تهیه شده مابین الک-های شماره ۴۰ و ۵۰ بوده و خاک رس از نوع بنتونیت انتخاب شده است. بنتونیت یکی از انواع خاک‌های معدنی پر کاربرد است که می‌توان آن را به دو دسته بنتونیت متورم شونده (بنتونیت سدیمی) و بنتونیت غیر متورم شونده (بنتونیت کلسیم دار) تقسیم بندی نمود. بنتونیت یک ماده ارگانیک است که دارای خواص پلاستیکی، ژلاتینی و چسبندگی زیاد بوده و حجم زیادی از آن را ذرات ریز آلومینا سیلیکات سه لایه و مونت موریونیت تشکیل می‌دهد. وجود پیوند واندروالسی میان ذرات بنتونیت توان جذب آب بسیار بالایی را به آن داده است. به همین دلیل رس و رفتار این خاک در حضور آب، آن را به عنوان نقطه قابل تمرکز و مهمی برای بسیاری از محققین قرار داده است. خاک رس بنتونیت

(سدیمی) مورد استفاده از کارخانه چینی مرند [18] با نام تجاری ZWNK1-T1 تهیه شده و مشخصات شیمیایی آن در جدول(۱) و میزان عناصر تشکیل دهنده آن در جدول (۳) قابل مشاهده است. منحنی دانه بندی مصالح طبق استاندارد ASTM D421 [19] و ASTM D422 [20] تعیین گردیده و در شکل (۳) ارائه شده است. بر اساس سیستم طبقه بندی خاکها به روش متحد (Unified)، خاک ماسه‌ای مورد استفاده از نوع SP با دانه بندی یکنواخت بوده و بنتونیت مورد مطالعه از نوع CH تعیین شده است. چگالی ویژه (Gs) و خصوصیات خمیری مصالح به ترتیب طبق استانداردهای ASTM D854 [21] و ASTM D4318-95A [22] برآورد گردیده و نتایج آن در جدول (۲) می‌توان مشاهده نمود. در نمونه‌های مخلوط مورد مطالعه بنتوینت در درصدهای وزنی ۱۵، ۳۰ و ۶۰ درصد با ماسه بادی مخلوط شده است.



شکل ۳ منحنی دانه بندی مصالح مورد استفاده در تحقیق حاضر

جدول ۱ مشخصات بنتونیت مورد استفاده [18]

مشخصات	نوع/ مقدار
پایه	مونت موریونیت
رنگ	سفید روشن
اندازه ابعاد ذرات	ریزتر از μm ۲۵
فاصله بین لایه ای	۳۲ انگستروم
رطوبت	کمتر از ۲ درصد

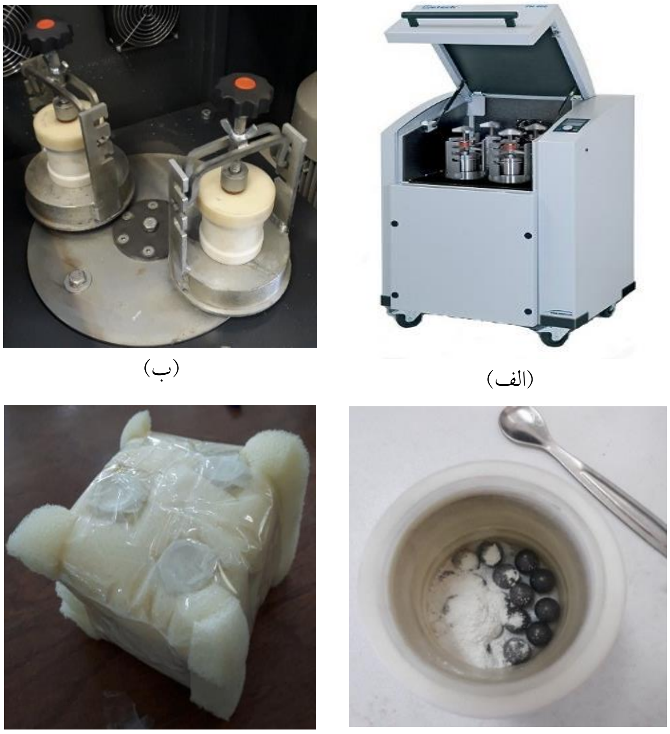
جدول ۲ خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح مورد مطالعه

ماسه	بنتونیت	خصوصیات ژئوتکنیکی
۰	۵۷	PI
۲/۶۵	۲/۷۵	Gs
۳۵	۲۰	(φ □)
۰/۰۴	۰/۷۲	C (kG/cm2)
۱/۶۴	۱/۳۸	γ_{dmax} (gr/cm3)
۰/۶	۰/۷۲	e_{min}

ذرات نانو سیمان مورد استفاده در مطالعه حاضر، از آسیاب نمودن ذرات سیمان تهیه شده از کارخانه سیمان صوفیان (تیپ ۲) با استفاده از گلوله‌های فلزی در آزمایشگاه تحقیقات نانوفناوری صنعتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز تهیه گردیده است (شکل ۴-الف، ب، ج و د). در این روش ذرات سیمان در اثر سایش مکانیکی ناشی از حرکت دورانی آسیاب سیاره‌ای به ذرات ریزتر در مقیاس نانو تبدیل شده‌اند. آسیاب سیاره‌ای یا گلوله‌ای یکی از متداول ترین انواع آسیاب‌های مورد استفاده در صنعت جهت تولید پودر نرم مواد در مقیاس ریز بوده و مکانیزم پودر کردن آن بر اساس حرکت دورانی استوانه دستگاه و ایجاد سایش بین گلوله و مواد می‌باشد. نام این آسیاب با توجه به مکانیزم حرکتی آن که مشابه حرکت سیاره‌ها به دور خورشید است تعیین شده است. به منظور تسهیل در عملیات تولید مواد نانو از استاریک اسید یا اولئیک اسید استفاده می‌شود. بدین ترتیب که میزان معینی از اولئیک اسید به اندازه یک الی دو قطره توسط قطره چکان برای هر محفظه اضافه گردیده تا رطوبت مورد نیاز در حین فرایند تولید نانو مواد تامین گردد. پس از تهیه مقداری از مواد نانو، برای اطمینان از صحت عملیات آسیاب و روند کار، نمونه‌ها در بسته بندی مناسب جهت تصویربرداری الکترونی به آزمایشگاه ارسال گردید. عناصر تشکیل دهنده ذرات نانو سیمان در جدول (۳) و تصویر الکترونیکی نانو سیمان تهیه شده در شکل (۵) قابل مشاهده می‌باشد.

در مطالعه حاضر به نمونه‌های ماسه بادی- بنتونیت به میزان، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد وزنی ذرات نانو سیمان اضافه گردیده تا امکان بهبودی خصوصیات رفتاری و ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. طبق استاندارد ASTM C618 [23]، هنگامیکه میزان مجموع عناصر $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$ حداقل برابر ۷۰٪ و SO_3 حداکثر برابر ۴٪ باشد رفتار پوزولانی و سیمانی شده بوجود خواهد آمد که این شرایط برای خاک رس

بنتونیت طبق جدول (۳) موجود است. بنابراین طبق استاندارد ASTM C305-14 [24] پس از اختلاط مصالح در میکسر(مخلوط کن) با یکدیگر(با درنظر گرفتن رطوبت بهینه)، نمونه‌های تهیه شده در ظروف پلاستیکی سر بسته در دمای محیط نگهداری شده و در مدت زمان های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عملیات عمل آوری روی آنها انجام گرفته است.

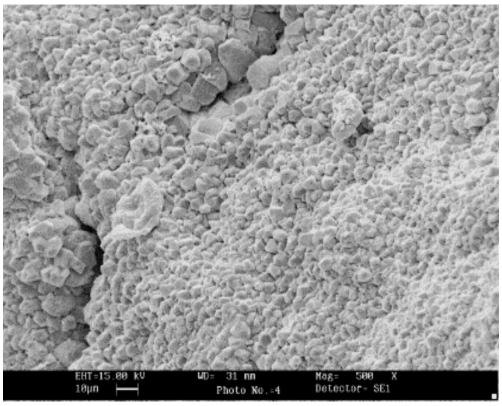


(الف) (ب) (ج) (د)

شکل ۴ نحوه تهیه نانو ذرات سیمان، (الف) دستگاه آسیاب سیاره‌ای، (ب) قرارگیری محفظه استوانه‌ای داخل آسیاب، (ج) محفظه دستگاه شامل گوی‌ها و نانو سیمان، (د) آماده سازی نمونه ها برای ارسال جهت عکس برداری الکترونیکی

جدول ۳ خصوصیات شیمیایی و درصد وزنی عناصر خاک رسی بنتونیت و نانو سیمان مورد مطالعه

ماده تشکیل دهنده	بنتونیت	نانو سیمان
SiO_2	۶۵	۲۱/۷
Al_2O_3	۲۳	۵/۲۲
Fe_2O_3	۰/۶۵	۳/۷۴
TiO_2	۰/۰۵	–
CaO	۱/۷	۱/۲۳
MgO	۰/۴۵	۲/۲۲
Na_2O	۰/۴	۰/۲۲
K_2O	۰/۵	۰/۵۸
SO_4	–	–
MnO	-	-
C_3S	-	۴۸/۴۸
C_2S	-	۲۶/۶۵
C_3A	-	۷/۴۹
C_4AF	-	۱۰/۵۵



شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونیکی از ذرات نانو سیمان تهیه شده

جدول ۴ برنامه آزمون های صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه در تحقیق حاضر

برنامه ریزی			مصالح		آزمایشات			
ردیف	نام نمونه	ماتریس خاک	بنتونیت(٪) ۰، ۱۵، ۳۰ و ۶۰	نانو سیمان (٪)	تراکم	تک محوری	برش مستقیم (خشک و اشباع)	CBR
۱	S-B-0% NC	ماسه	*	*	*	*	*	*
۲	S-B-0.2% NC	ماسه	*	*	*	*	*	*
۳	S-B-0.4% NC	ماسه	*	*	*	*	*	*
۴	S-B-0.6% NC	ماسه	*	*	*	*	*	*

کارهای آزمایشگاهی

بمنظور تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی و مکانیکی مخلوط ماسه بادی-بنتونیت تحت اثر ذرات نانو سیمان، ابتدا آزمون تراکم آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTM D698 [25] انجام گرفت. در ادامه، آزمایش مقاومت فشاری تک محوری طبق استاندارد ASTM D2166 [26] صورت پذیرفت. در مرحله بعد بمنظور تعیین مقاومت برشی خاک تثبیت شده آزمون برش مستقیم طبق استاندارد ASTM D3080-11 [27] در دو حالت خشک (مصالح ۲۴ ساعت در گرمخانه نگهداری شده و سپس مخلوط شده‌اند) و اشباع بر روی نمونه‌های با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتیمتر مربع بصورت کنترل کرنش انجام پذیرفت. بطوریکه نمونه‌های بهسازی شده پس از اشباع و تحکیم، تحت اثر تنش های قائم ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر سانتیمتر و با سرعت ۰/۰۵ میلیمتر بر دقیقه تحت آزمایش قرار گرفتند. در انتها، آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) مطابق با استاندارد ASTM D1883 [28] در شرایط خشک و انرژی تراکمی ۵۶ ضربه برای هر لایه انجام گرفت. بگونه‌ای که مطابق استاندارد سرعت بارگذاری ۱/۲۷mm/min انتخاب شده و عدد CBR برای نفوذ پیستون به میزان ۵ سانتیمتر برآورد گردیده است. برنامه آزمایشگاهی صورت گرفته بر روی نمونه‌های مورد مطالعه مطابق جدول (۴) قابل مشاهده است. لازم بذکر است در تمامی آزمون‌های ذکر شده، نمونه های مخلوط به مدت ۱، ۷ و ۲۸ روز عمل آوری شده اند و ۲۵٪ از مجموع آزمایش‌های انجام یافته جهت بررسی صحت نتایج بدست آمده دوباره تکرار شده است.

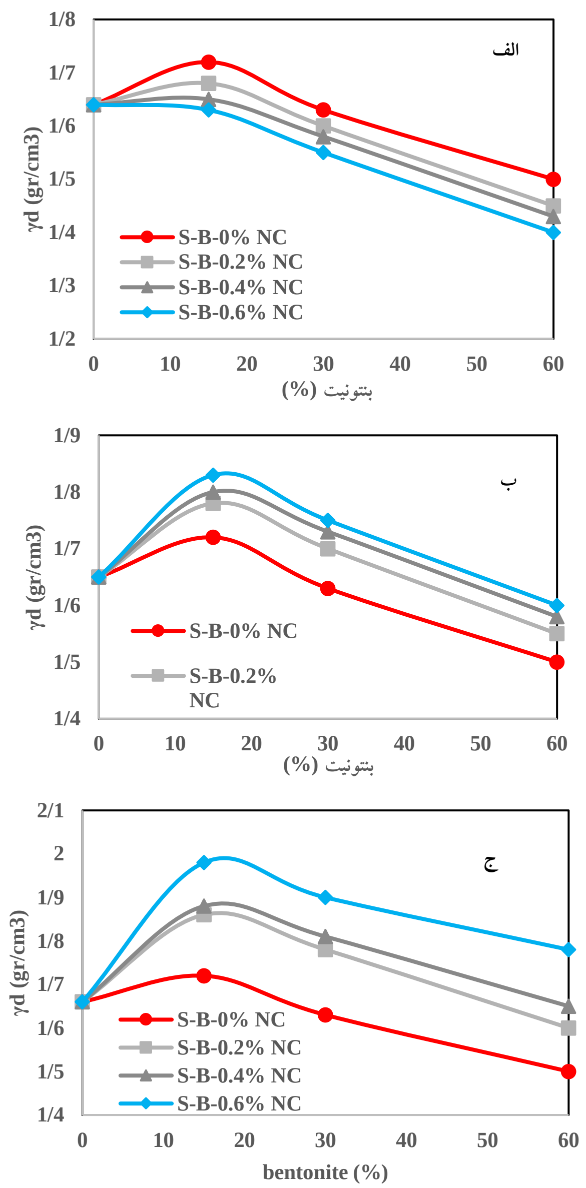
نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش تراکم

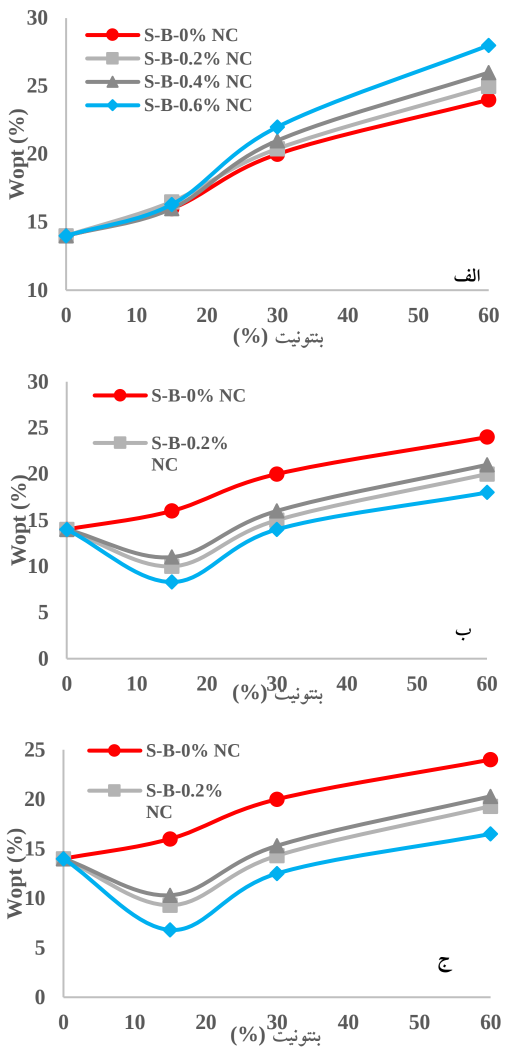
تاثیر نانو ذرات سیمان بر روی نتایج حاصل از آزمون تراکم نمونه‌های مخلوط ماسه بادی-بنتونیت مورد مطالعه در نمودارهای شکل(۶- الف، ب و ج) و شکل(۷-الف، ب و ج) ارائه شده است. در شکل(۶-الف، ب و ج) می‌توان تاثیر همزمان ذرات نانو سیمان و مدت عمل آوری را بر روی مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر مشاهده نمود. براین اساس طبق نمودارهای شکل (۶-الف) دیده می‌شود در مدت زمان عمل آروی یک روزه نمونه‌ها، مخلوط ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت

دارای بالاترین میزان وزن مخصوص خشک حداکثر است. زیرا، آن مقدار بنتونیت سبب بهم نزدیک شدن بیشتر ذرات ماسه به یکدیگر شده است. از سوی با بالا رفتن سطح تماس بین آنها و افزودن نانو سیمان واکنش شیمیایی پوزولانی اولیه بین آنها برقرار شده ولی در مدت زمان کوتاه عمل آوری تاثیرگذاری مناسبی از خود نشان نمی دهند. در حالیکه، طبق نمودارهای شکل(۶-ب) و (۶-ج) وزن مخصوص خشک حداکثر در مخلوط ماسه بادی- بنتونیت متاثر از حضور ذرات نانو سیمان و مدت زمان عمل آوری است. بطوریکه با افزایش درصد نانو سیمان در نمونه‌ها و طولانی شدن مدت زمان عمل آوری و تکمیل شدن واکنش پوزولانی بین ذرات مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر افزایش یافته است و حضور ۰/۶ درصد نانو سیمان در ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت باعث نمایان شدن بیشینه‌ترین مقدار در وزن مخصوص خشک حداکثر گردیده و در مدت زمان‌های عمل آوری ۷ و ۲۸ روزه مقدار آن را در مقایسه با حالت یک روزه به ترتیب به مقدار ۱۲ ٪ و ۲۱ درصد افزایش یافته است.

همچنین، با توجه به نمودارهای شکل(۷-الف، ب وج) تاثیر ذرات نانو سیمان را بر روی میزان رطوبت بهینه مخلوط ماسه بادی-بنتونیت را می‌توان مشاهده نمود. طبق نمودارهای شکل(۷-الف) دیده می‌شود ذرات نانو سیمان در مدت زمان عمل آوری یک روزه تاثیر چندانی بر روی رفتار نمونه‌ها نداشته و با بالا رفتن همزمان مقدار درصد بنتونیت و ذرات نانو سیمان مقدار رطوبت بهینه یک روند افزایشی را طی می‌نماید. در ادامه، با طولانی شدن مدت زمان عمل آوری به ۷ و ۲۸ روز، همانگونه که در نمودارهای شکل(۷-ب) و (۷-ج) ارائه شده است، ذرات نانو سیمان بر روی جذب رطوبت نمونه‌ها اثرگذاری دارد و کمینه‌ترین مقدار رطوبت بهینه در نمونه ماسه به همراه ۱۵ درصد بنتونیت با افزوده شده ۰/۶ درصد نانو سیمان اتفاق افتاده است. بطوریکه در مدت زمان‌های عمل آوری ذکر شده، مقدار رطوبت بهینه به ترتیب ۴۰ درصد و ۵۱ درصد کاسته شده است. با توجه به نتایج ارائه شده حاصل از آزمایش تراکم می‌توان بیان نمود، افزودن ۰/۶ درصد وزنی نانو سیمان در نمونه مخلوط ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت همزمان با مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه، بهینه ترین نتیجه را ارائه نموده است. زیرا حضور ۱۵ درصد بنتونیت در خاک ماسه‌ای سبب بالا رفتن سطح تماس بین ذرات ماسه شده و افزودن ۰/۶ درصد نانو سیمان و تکمیل واکنش سمنتاسیون بعد از ۲۸ روز عمل آوری و تشکیل بافتهای جدید در اثر تغییر ساختار دانه بندی از ریزدانه به سمت درشت دانه میزان تراکم پذیر را افزایش داده کاهش فضای خالی بین آنها بوقوع پیوسته است. همزمان بدلیل تغییر بافت خاک تثبیت شده میزان جذب رطوبت نیز کاهش یافته و به عبارت دیگر خاصیت تورمی و افزایش بنتونیت کاهش یافته است.



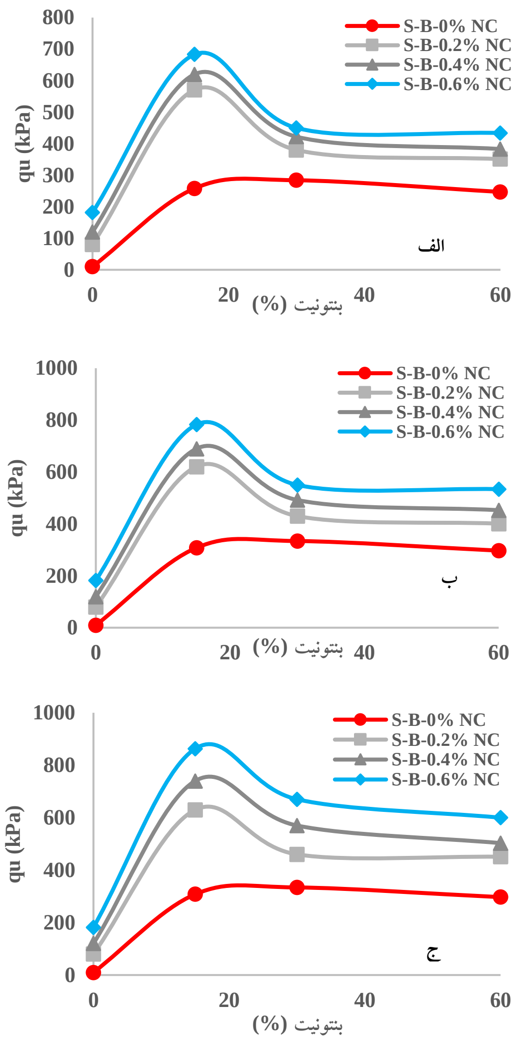
شکل ۶ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی مقادیر وزن مخصوص خشک حداکثر، (الف) مدت زمان عمل آوری ۱ روزه، (ب) مدت زمان عمل آوری ۷ روزه، (ج) مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۷ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی مقادیر رطوبت بهینه، (الف) مدت زمان عمل آوری ۱ روزه، (ب) مدت زمان عمل آوری ۷ روزه، (ج) مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه

نتایج حاصل از آزمایش تک‌محوری

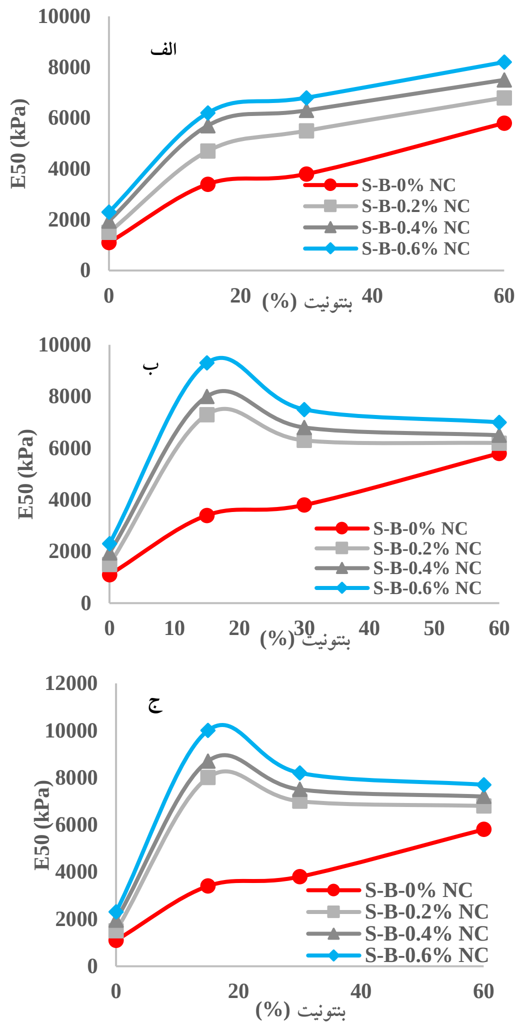
تاثیر ذرات نانو سیمان همراه با مدت زمان عمل آوری بر روی نتایج حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری نمونه‌های مورد تحقیق در شکل(۸–الف، ب و ج) مشاهده می‌شود. طبق نمودارهای شکل(۸) می‌توان دریافت در تمامی مدت زمان‌های عمل آوری ذرات نانو سیمان رفتار مکانیکی مخلوط ماسه بادی–بنتونیت را تحت تاثیر قرار می‌دهد و کنترل کننده میزان توانایی باربری است. بطوریکه ماسه بادی مخلوط شده با ۱۵ درصد بنتونیت به همراه ۰/۶ درصد نانو سیمان دارای بالاترین مقدار توانایی باربری می‌باشد. میزان افزایش مقاومت در مدت زمان‌های عمل آوری ۱، ۷ و ۲۸ روزه بترتیب ۱/۶۴ ، ۱/۵۴ و ۱/۸ برابر است. اگرچه با مرور نمودارهای ارائه شده می‌توان دریافت، در نمونه‌هایی که ذرات نانو سیمان موجود نمی باشد حضور ۳۰ درصد بنتونیت در خاک ماسه بادی باعث بیشینه شدن مقاومت فشاری گردیده ولی قابل مقایسه با تاثیرگذاری نانو سیمان در توانایی باربری نمونه‌ها نمی باشد. از سوی دیگر، با افزایش مقدار بنتونیت در خاک ماسه رفتار مکانیکی خاک همراه با تغییر ساختار و بافت خاک از درشت دانه به سمت ریزدانه و حتی با حضور ذرات نانو سیمان در تمامی مدت زمان های عمل آوری و تکمیل واکنش شیمیایی پوزولانی میزان توانایی باربری یک روند کاهندگی را نشان می‌دهد زیرا آن میزان نانو سیمان برای ایجاد تغییر در بافت خاک رسی بنتونیت کافی نمی‌باشد و ذرات ماسه در داخل بنتونیت حالت غوطه ور پیدا می‌کنند و تماس بین آنها حداقل می‌باشد.



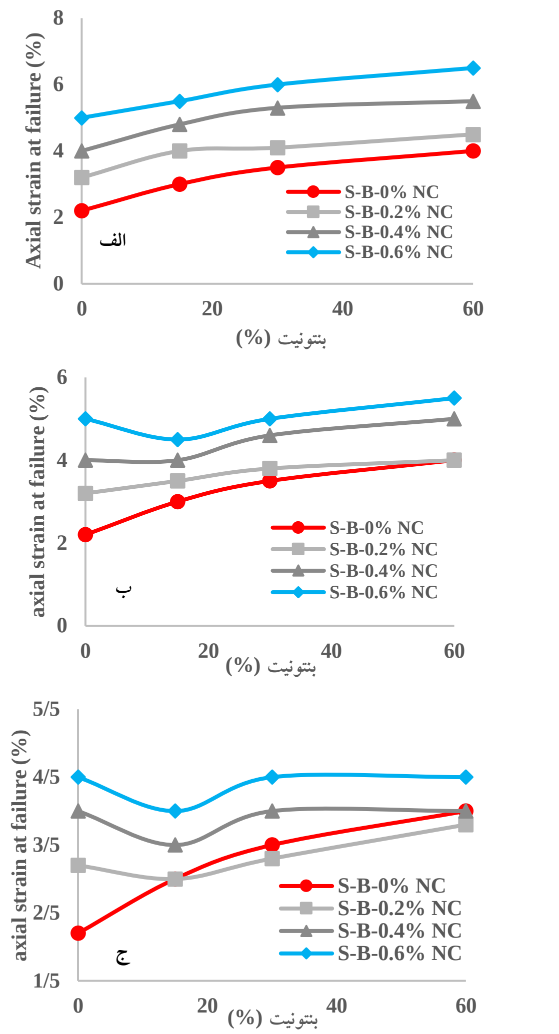
شکل ۸ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی مقادیر مقاومت فشاری تک محوری، (الف) مدت زمان عمل آوری ۱ روزه، (ب) مدت زمان عمل آوری ۷ روزه، (ج) مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه

در ادامه، جهت بررسی و ارزیابی اثر نانو سیمان بر میزان شکل پذیری مخلوط ماسه بادی- بنتونیت، با استفاده از منحنی تنش- کرنش حاصل از آزمون مقاومت فشاری تک محوری، مدول تغییر شکل سکانت نمونه‌ها (E_{50}) تعیین گردید و در شکل (۹-الف، ب و ج) نمایش داده شد. با توجه به نمودارهای شکل (۹- الف)، مشاهده می‌شود در مدت زمان عمل آوری یک روزه با افزایش مقادیر بنتونیت در خاک ماسه به همراه ذرات نانو سیمان، ساختار خاک مخلوط انعطاف پذیرتر گردیده و سبب بالا رفتن مقدار مدول سکانت می‌گردد. طوریکه مخلوط ماسه با ۶۰ درصد بنتونیت به همراه ۰/۶ درصد نانو سیمان مدول سکانت را به مقدار ۴۱ درصد افزایش داده است. از سوی دیگر، با افزایش مدت زمان عمل آوری به ۷ و ۲۸ روز طبق نمودارهای شکل‌های (۹-ب و ج) می‌توان دریافت زمانیکه ۰/۶ درصد ذرات نانو سیمان به مخلوط ماسه با ۱۵ درصد بنتونیت افزوده می‌شود بیشترین مقدار در مدول سکانت را ارائه می‌نماید و مقدار آن را به ترتیب ۱/۷۳ و ۱/۹۴ برابر افزایش می‌دهد. بنابراین با درنظر گرفتن مقادیر ذکر شده می توان بیان کرد با بالا رفتن مدت زمان عمل آوری همراه با افزودن ۰/۶ درصد نانو سیمان به مخلوط ماسه با ۱۵ درصد بنتونیت و تکمیل واکنش پوزولانی سبب بالا رفتن خاصیت ارتجاعی شده و میزان وقوع نشست و تغییر شکل کاهش می‌یابد. در انتها طبق نمودارهای شکل (۹-ب و ج)، علیرغم افزایش میزان مدت زمان عمل آوری و درصد نانو سیمان هنگامیه مقدار بنتونیت در خاک ماسه اضافه می‌شود رفتار خاک نرم تر شده و مدول سکانت کاسته می شود. این شرایط بیان کننده آن است میزان درصد نانو سیمان مصرفی برای مقادیر بنتونیت موجود در نمونه‌های ماسه بادی مورد مطالعه کافی نبوده و در جهت تکمیل واکنش‌های شیمیایی و تغییر بافت در ساختار خاک به مقدار ذرات نانو سیمان بیشتری نیاز است تا فرایند واکنش پوزولانی تکمیل گردد.

میزان کرنش محوری در لحظه گسیختگی نمونه‌های مخلوط ماسه بادی- بنتونیت تحت تاثیر ذرات نانو سیمان در نمودارهای شکل (۱۰-الف، ب و ج) قابل مشاهده است. با توجه به نمودارهای شکل (۱۰-الف) دیده می‌شود ذرات نانو سیمان در مدت زمان عمل آوری یک روزه از نقطه نظر رفتاری، تاثیر گذاری مناسبی نداشته و با افزایش مقدار بنتونیت تا ۶۰ درصد در خاک ماسه هم زمان با انعطاف پذیری بالا، شکل پذیری نیز افزایش یافته است. ولی با افزایش مدت زمان عمل آوری به ۷ و ۲۸ روزه، طبق نمودارهای شکل (۱۰-ب و ج) می‌توان مشاهده نمود، حضور ۰/۶ درصد نانو سیمان در خاک ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت باعث رفتار سخت و ترد شونده شده است. طوریکه میزان کرنش برشی در لحظه گسیختگی در مدت زمان‌های عمل آوری ذکر شده به ترتیب ۵۰ و ۳۳ درصد کاهندگی نشان داده است. البته همزمان با افزایش میزان درصد بنتونیت در خاک ماسه بادی و نانو سیمان در مخلوط، علی رغم طولانی شدن مدت زمان عمل آوری رفتار نمونه‌های تثبیت شده به سمت شکل پذیری میل کرده و مقدار کرنش محوری در لحظه گسیختگی افزایش می‌یابد. با مقایسه نمودارهای شکل (۹-ج) و شکل (۱۰-ج) دیده می شود، د رمدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه تغییرات دو پارامتر مدول سکانت (E_{50}) و کرنش محوری در لحظه گسیختگی برعکس هم می باشند که نشان از صحت نتایج دارد.



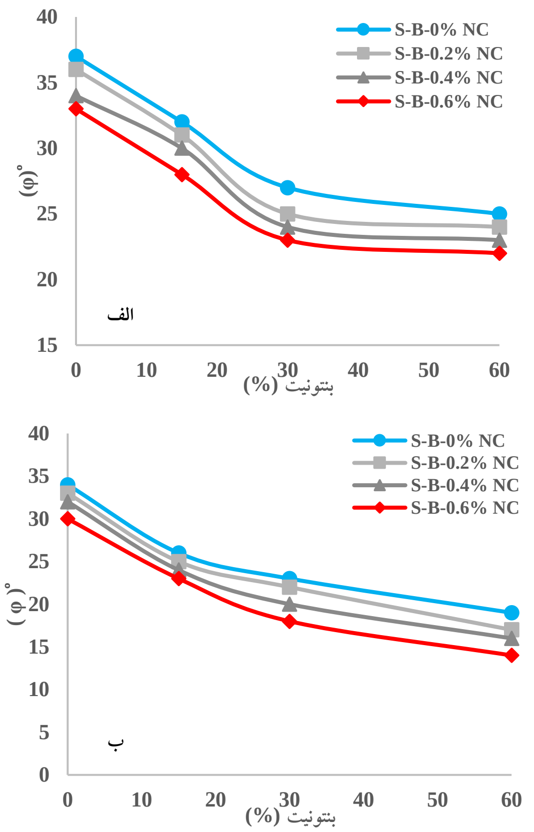
شکل ۹ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی مدول سکانت مخلوط ماسه بادی- بنتونیت مورد مطالعه، (الف) مدت زمان عمل آوری ۱ روزه، (ب) مدت زمان عمل آوری ۷ روزه، (ج) مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه



شکل ۱۰ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی کرنش محوری در لحظه گسیختگی خاک مخلوط ماسه بادی-بنتونیت مورد مطالعه، (الف) مدت زمان عمل آوری ۱ روزه، (ب) مدت زمان عمل آوری ۷ روزه، (ج) مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه

نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم

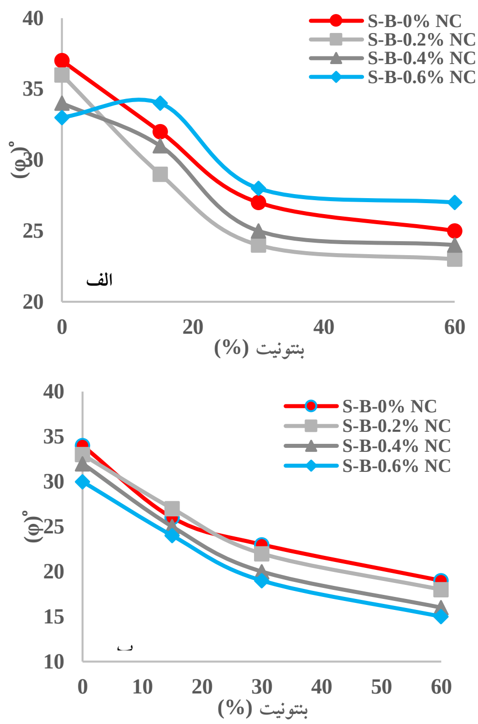
بمنظور بررسی تاثیر ذرات نانو سیمان بر میزان توانایی باربری و مقاومت برشی نمونه‌های مورد مطالعه آزمون برش مستقیم در دو حالت خشک و اشباع تحت تنش‌های قائم ۱، ۲ و ۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع و با سرعت کند انجام گرفته است. مقادیر زاویه اصطکاک داخلی(φ) نمونه‌های مخلوط در مدت زمان‌های عمل آوری ۱، ۷ و ۲۸ روزه در دو حالت شرایط بارگذاری خشک و اشباع به ترتیب در نمودارهای شکل‌های (۱۱-الف و ب) ، (۱۲-الف و ب) و (۱۳-الف و ب) ارائه گردیده است. براساس نمودارهای شکل (۱۱-الف وب) مشاهده می‌شود، زاویه اصطکاک داخلی مخلوط‌های ماسه بادی-بنتونیت در حالت خشک در مقایسه با شرایط اشباع دارای مقادیر نسبی بالاتری می‌باشند. از نقطه نظر زمان عمل آوری، در زمان یک روزه و هر دو شرایط خشک و اشباع، با افزایش میزان بنتونیت در خاک ماسه بادی مقدار زاویه اصطکاک داخلی یک روند کاهشی را طی می‌نماید که این شرایط ناشی بالا بودن فضای خالی بین ذرات بنتونیت و ساختار فلکوله‌ای آنها است. همچنین افزودن ذرات نانو سیمان در مدت زمان عمل آوری مذکور مزید علت شده و با افزایش مقدار آن تا ۰/۶ درصد در نمونه‌های مورد مطالعه زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته است. بنابراین می‌توان بیان کرد در مدت زمان عمل آوری یک روزه، ذرات نانو سیمان در مخلوط ماسه بادی-بنتونیت تاثیر چندان نداشته و ذرات بنتونیت تغییرات در زاویه اصطکاک داخلی را کنترل می‌نمایند.



شکل ۱۱ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی زاویه اصطکاک داخلی خاک مخلوط ماسه بادی-بنتونیت مورد مطالعه در مدت عمل آوری ۱ روزه، (الف) حالت خشک، (ب) حالت اشباع

همانطور که در نمودارهای شکل (۱۲-الف و ب) مشاهده می‌شود در مدت زمان عمل آوری ۷ روزه نیز مشابه با شرایط عمل آوری یک روزه، مخلوط‌های ماسه بادی-بنتونیت بارگذاری

شده در شرایط خشک دارای زاویه اصطکاک داخلی بیشتری در مقایسه با حالت اشباع هستند. در مدت زمان عمل آوری ۷ روزه، در شرایطی که مخلوط‌های ماسه بادی-بنتونیت بصورت خشک مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، طبق نمودارهای شکل (۱۲-الف) مشاهده می‌شود با افزایش بنتونیت به ۶۰ درصد در ماسه بادی و افزودن ذرات نانو سیمان از ۰/۲ تا ۰/۴ درصد، زاویه اصطکاک داخلی کاهش می‌یابد. اگرچه روند ذکر شده در نمونه‌های ماسه بادی حاوی بنتونیت با همراه ۰/۶ درصد نانو سیمان متفاوت بوده و مقدار زاویه اصطکاک داخلی در مقایسه با مخلوط‌های ماسه بادی-بنتونیت فاقد نانو سیمان افزایش یافته است. همچنین افزودن ۰/۶ درصد نانو سیمان به مخلوط ماسه با ۱۵ درصد بنتونیت بالاترین تاثیر را داشته و مقدار زوایه اصطکاک داخلی را ۳ درصد افزایش داده است ولی از مقدار زاویه اصطکاک داخلی در ماسه خالص تجاوز ننموده است. برخلاف شرایط خشک، طبق نمودارهای شکل (۱۲-ب) در حالت بارگذاری اشباع دیده می‌شود علیرغم مدت زمان عمل آوری ۷ روزه با افزایش مقدار ذرات نانو سیمان و بنتونیت در خاک ماسه بادی زاویه اصطکاک داخلی یک روند کاهندگی را به نمایش می‌گذارد.

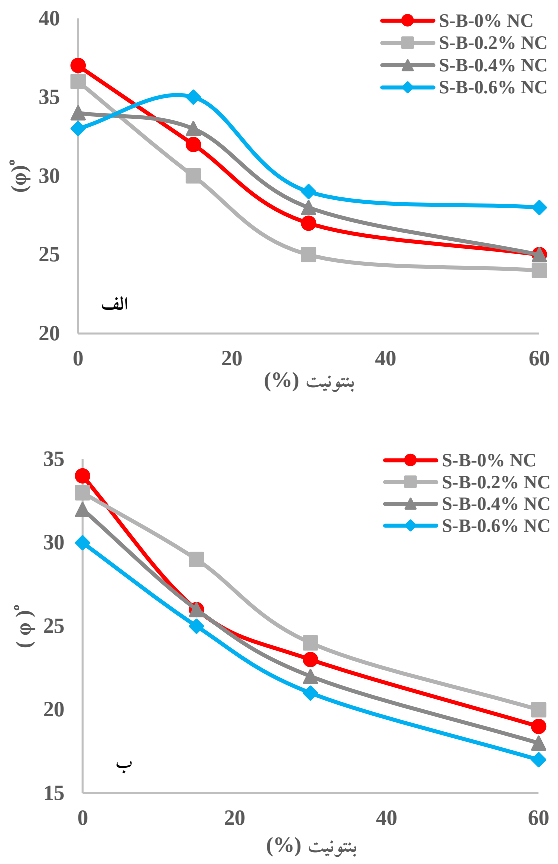


شکل ۱۲ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی زاویه اصطکاک داخلی خاک مخلوط ماسه بادی-بنتونیت مورد مطالعه در مدت عمل آوری ۷ روزه، (الف) حالت خشک، (ب) حالت اشباع

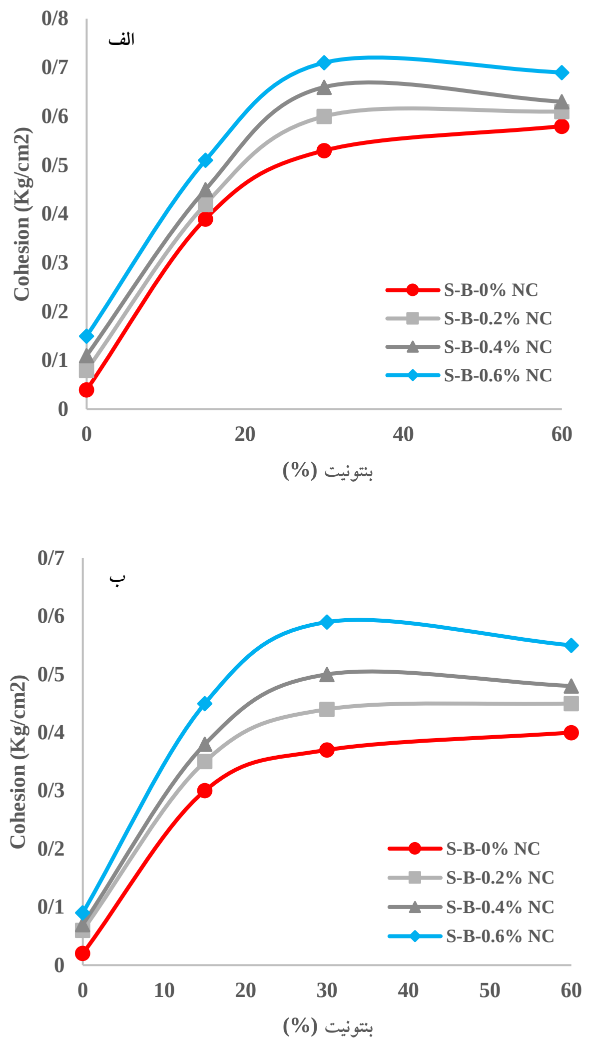
در گام بعدی، براساس شکل (۱۳-الف و ب) وقتی مدت زمان عمل آوری نمونه‌های مورد آزمایش به ۲۸ روز افزایش یافته مشاهده می‌گردد مطابق با حالت‌های قبلی با افزایش درصد بنتونیت در ماسه بادی زاویه اصطکاک داخلی کاسته می‌شود. در نمونه‌های خشک طبق نمودارهای شکل (۱۳-الف) دیده می‌شود در مخلوط ماسه بادی- بنتونیت (حاوی ۱۵ و ۳۰درصد)، با افزودن ۰/۴ و ۰/۶ درصد نانو سیمان باعث افزایش یافتن زاویه اصطکاک داخلی شده است. البته این روند در ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت به همراه ۰/۴ و ۰/۶ درصد نانو سیمان بیشتر نمود یافته و مقدار افزایش به ترتیب ۳/۱ و ۹ درصداست. از سوی دیگر، در حالت اشباع افزایش مدت زمان عمل آوری بر روی رفتار نانو سیمان در مخلوط ماسه بادی-بنتونیت تاثیرگذاری نداشته و با افزایش نانو سیمان و بنتونیت در خاک ماسه بادی زاویه اصطکاک داخلی کاسته شده است. با مرور کلی مقادیر زاویه اصطکاک داخلی برآورد شده در نمونه‌های تثبیت شده مشاهده می‌گردد شکل فلکولهای ذرات بنتونیت و خاصیت جذب آب توسط آنها تاثیرگذار می‌باشد. در بارگذاری در حالت خشک بعد از ۲۸ روز عمل آوری و افزودن ۰/۶ درصد نانو سیمان به خاک مخلوط و تکمیل واکنش پوزولانی باعث بهبود مقدار زاویه اصطکاک داخلی شده است. در بارگذاری در شرایط اشباع، خاصیت جذب بالای آب توسط بنتونیت و شکل ذرات مزید علت شده و حتی با حضور نانو سیمان و اتمام واکنش پوزولانی مقدار زاویه اصطکاک کاهش یافته است. این روند بیان کننده آن است میزان نانو سیمان جهت تثبیت خاک مخلوط ماسه-بنتونیت در شرایط اشباع کافی نبوده و بایستی مطالعات بیشتری انجام یابد.

در نمودارهای شکل‌های(۱۴-الف وب)،(۱۵-الف و ب) و (۱۶-الف و ب) به ترتیب می‌توان تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی مقدار پارامتر چسبندگی مخلوط ماسه بادی-بنتونیت را در مدت زمان‌های عمل آوری ۱، ۷ و ۲۸ روزه را در شرایط بارگذاری خشک و اشباع مشاهده نمود. بر این اساس، طبق نمودارهای شکل (۱۴-الف و ب) در مدت زمان عمل آوری یک روزه، دیده می‌شود بطورکلی چسبندگی نمونه‌ها در شرایط بارگذاری خشک در مقایسه با حالت اشباع دارای میزان بیشتری است. همچنین با افزایش بنتونیت در ماسه بادی و بدون حضور نانو سیمان، مقدار چسبندگی نمونه‌های مخلوط یک روند صعودی را طی می‌نماید.

زمانیکه نانو سیمان به مخلوط ها افزوده می‌شود، مشابه حالت قبل روند افزایش چسبندگی صعودی بوده و بالاترین مقدار چسبندگی در مخلوط ماسه با ۳۰ درصد بنتونیت به همراه ۰/۶ درصد نانو سیمان مشاهده می‌گردد. میزان افزایش برابر با ۳۴ درصد نسبت به حالت بدون افزودن نانو سیمان است. در شرایط بارگذاری اشباع، طبق نمودارهای شکل (۱۴-ب) می‌توان دریافت مشابه با حالت خشک با افزایش حضور بنتونیت در خاک ماسه بادی چسبندگی افزایش یافته است. همچنین با افزایش حضور ذرات نانو سیمان در مخلوط ماسه بادی-بنتونیت پارامتر چسبندگی بیشینه می‌شود. همانند حالت خشک حداکثر مقدار چسبندگی در ماسه با ۳۰ درصد بنتونیت به همراه ۰/۶ درصد دیده می شود که این میزان افزایش برابر با ۶۰ درصد می‌باشد.



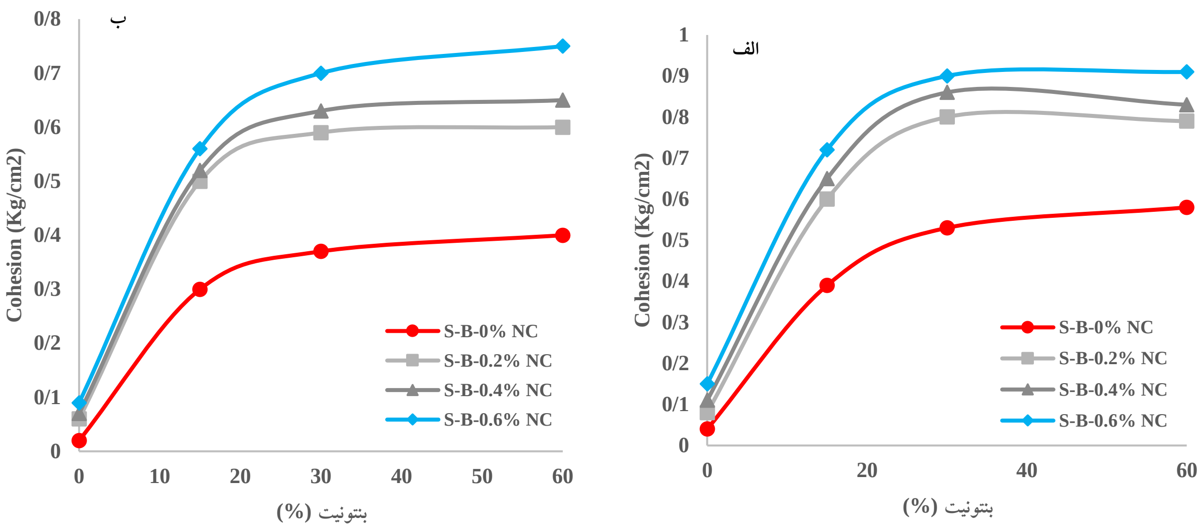
شکل ۱۳ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی زاویه اصطکاک داخلی خاک مخلوط ماسه بادی-بنتونیت مورد مطالعه در مدت عمل آوری ۲۸ روزه، (الف) حالت خشک، (ب) حالت اشباع



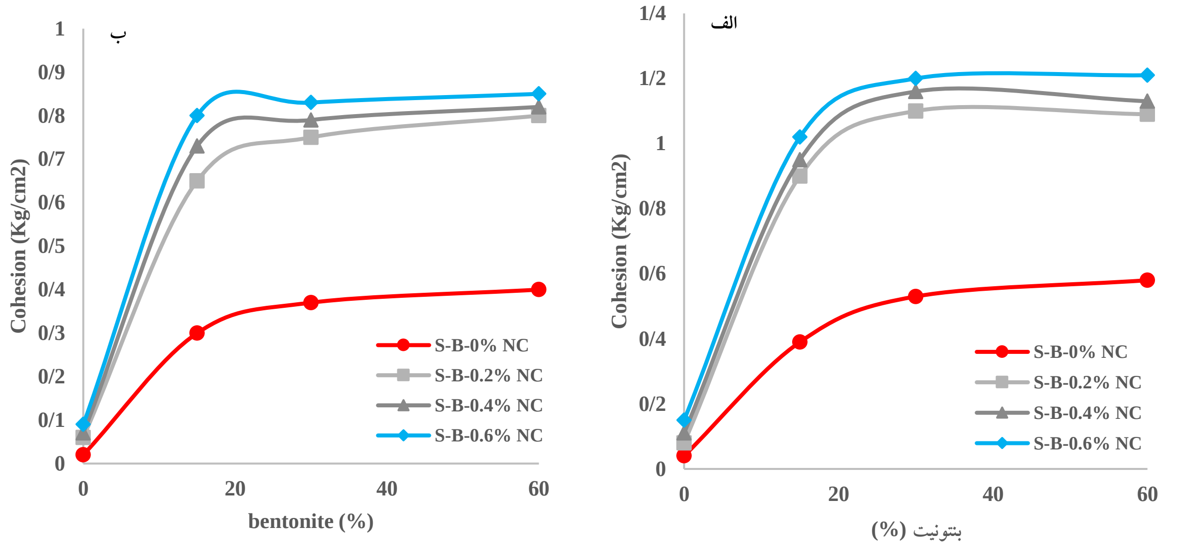
شکل ۱۴ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی چسبندگی خاک مخلوط ماسه بادی-بنتونیت مورد مطالعه در مدت عمل آوری ۱ روزه، (الف) حالت خشک، (ب) حالت اشباع

هنگامیکه مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها به ۷ روز افزایش می‌یابد با توجه به نمودارهای شکل (۱۵-الف وب) مشاهده می-شود در هر دو شرایط بارگذاری خشک و اشباع مشابه با حالت عمل آوری یک روزه حضور همزمان نانو سیمان و بنتونیت در خاک ماسه بادی باعث افزایش چسبندگی در نمونه‌های مخلوط گردیده است. همچنین بالاترین میزان چسبندگی نیز در مخلوط ماسه بادی-بنتونیت با همراه ۰/۶ درصد نانو سیمان دیده شده است. میزان نرخ رشد در ماسه بادی به همراه ۳۰ درصد بنتونیت در شرایط بارگذاری خشک و ماسه بادی به همراه ۶۰ درصد بنتونیت در حالت اشباع به ترتیب ۷۰ و ۸۹ درصد است.

در هر دو شرایط بارگذاری خشک و اشباع با بالا رفتن طول مدت زمان عمل آوری نمونه‌ها به ۲۸ روز، همانطور که در نمودارهای شکل(۱۶-الف وب) مشاهده می‌گردد چسبندگی مشابه با حالت های گذشته ذکر شده افزایش یافته است. با این تفاوت که میزان نرخ افزایش چسبندگی در نمونه‌های مخلوط شده با نانو سیمان از ۰/۲ تا ۰/۶ درصد در مقایسه با حالت‌های قبلی بسیار به هم نزدیک هستند. البته حداکثر مقدار چسبندگی نیز در نمونه‌های ماسه بادی-بنتونیت با همراه ۰/۶ درصد نانو سیمان دیده شده است. نرخ رشد در ماسه بادی همراه با ۶۰ درصد بنتونینت در شرایط بارگذاری خشک و حالت اشباع به ترتیب ۱/۱ و ۱۲/۱ برابر است.



شکل ۱۵ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی چسبندگی خاک مخلوط ماسه بادی-بنتونیت مورد مطالعه در مدت عمل آوری ۷ روزه، (الف) حالت خشک، (ب) حالت اشباع



شکل ۱۶ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی چسبندگی خاک مخلوط ماسه بادی-بنتونیت مورد مطالعه در مدت عمل آوری ۲۸ روزه، (الف) حالت خشک، (ب) حالت اشباع

طبق جدول‌های(۵) و (۶) می‌توان تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی مقاومت برشی نمونه‌های مخلوط ماسه بادی-بنتونیت را در مدت زمان‌های عمل آوری ۱، ۷ و ۲۸ روزه را در هر دو شرایط بارگذاری خشک و اشباع ارائه شده است. طبق جدول (۵) با در نظر گرفتن مدت زمان عمل آوری و میزان درصد نانو سیمان بر تاثیرگذاری بر نرخ تغییرات مقاومت برشی نمونه‌های مخلوط ماسه بادی و بنتونیت در شرایط بارگذاری خشک می توان بیان نمود، اولا در مدت زمان عمل آوری یک روزه، حضور نانو سیمان در نمونه‌های مورد تحقیق تاثیر کاهشی بر مقاومت برشی داشته و با افزایش مدت زمان عمل آوری به ۷ و ۲۸ روز رفتار ژئوتکنیکی تغییر یافته و مقاومت برشی نمونه‌های حاوی نانو سیمان افزایش یافته‌اند. ثانیا، حضور ۰/۶ درصد نانو سیمان در نمونه مخلوط ماسه با ۱۵ درصد بنتونیت با مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه سبب شده است تا مقدار مقاومت برشی خاک در تمامی مقادیر تنش‌های قائم بطور میانگین ۵۲/۵ درصد افزایش یابد. همانگونه که در جدول(۶) مشاهده می‌شود در شرایط بارگذاری اشباع، مشابه با حالت بارگذاری خشک، حضور ذرات نانو سیمان در نمونه‌ها در مدت زمان عمل آوری یک روزه سبب کاهش میزان توانایی باربری آنها شده است. در ادامه، با افزایش مدت زمان عمل آوری، افزودن ذرات نانو سیمان به آنها میزان مقاومت برشی را در تمامی مقادیر تنش‌های قائم افزایش داده است. در شرایط بارگذاری اشباع، بیشتر مقاومت برشی در نمونه‌های مخلوط ماسه بادی به همراه ۳۰ درصد بنتونیت با مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه دیده شده است. مقاومت برشی بطور میانگین ۴۰/۷ درصد در تمامی مقادیر تنش قائم بالا رفته است. با مطالعه کلی نتایج بدست آمده از آزمون برش مستقیم (در هر دو حالت بارگذاری در شرایط خشک و اشباع) می‌توان دریافت مقاومت برشی خاک تثبیت شده با افزودن نانو سیمان و اتمام واکنش پوزولانی بعد از ۲۸ روز عمل آوری متاثر از میزان چسبندگی می‌باشد. همانگونه که مشاهده شد، عموما افزودن نانو سیمان باعث افزایش چسبندگی در نمونه‌ها در هر دو حالت خشک و اشباع شده و در حالیکه تغییرات میزان زاویه اصطکاک داخلی این چنین نبوده است. این روند بیان کننده آن است افزودن نانو سیمان به مخلوط ماسه-بنتونیت بدلیل واکنش پوزولانی سبب افزایش خاصیت ارتجاعی و چسبندگی بین ذرات شده است.

جدول ۵ میزان تاثیر ذرات نانو سیمان بر مقاومت برشی نمونه‌های مورد مطالعه در مقایسه با حالت تثبیت نشده- شرایط بارگذاری خشک

مدت زمان عمل آوری	۱روزه								
نمونه	۰/۲ ٪ نانو سیمان			۰/۴ ٪ نانو سیمان			۰/۶ ٪ نانو سیمان		
بار kG/cm2)	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
ماسه	٪ ۱/۲۵	– ٪ ۰/۶۴	٪ ۰/۸۷	– ٪ ۲/۵	– ٪ ۳/۲۲	٪ ۷/۴۲	– ٪ ۱/۲۵	– ٪ ۶/۴۵	٪ ۸/۲۹
ماسه+۱۵٪ بنتونیت	– ٪ ۱/۹۲	– ٪ ۰/۶۱	٪ ۱/۳۳	– ٪ ۰/۹۶	– ٪ ۱/۸۴	٪ ۲/۶۶	– ٪ ۲/۸۸	– ٪ ۴/۹۰	٪ ۶/۶۶
ماسه+ ۳۰٪ بنتونیت	– ٪ ۵/۳	– ٪ ۰/۶۴	٪ ۲/۴۲	– ٪ ۲/۶۵	– ٪ ۱/۲۹	٪ ۳/۸۸	– ٪ ۷/۹۶	– ٪ ۱/۹۳	٪ ۴/۳۶
ماسه+۶۰٪ بنتونیت	– ٪ ۲/۷۵	– ٪ ۱/۹۷	٪ ۳/۰۱	– ٪ ۱/۸۳	– ٪ ۴/۶۰	٪ ۵/۰۲	– ٪ ۳/۶۶	– ٪ ۵/۲۶	٪ ۵/۰۲
مدت زمان عمل آوری	۷ روزه								
ماسه	٪ ۲/۵۳	٪ ۰	٪ ۴/۷۶	–٪ ۱/۲۶	۱/۲۹	٪ ۹/۵۲	٪ ۱/۲۶	٪ ۱/۹۴	٪ ۱۱/۹
ماسه+۱۵٪ بنتونیت	٪ ۱۱/۳	٪ ۳/۴	٪ ۲/۲۲	٪ ۳/۲۲	٪ ۱۳/۵	٪ ۸/۸۸	٪ ۸/۰۶	٪ ۲۶/۴	٪ ۲۱/۳
ماسه+ ۳۰٪ بنتونیت	٪ ۱۳/۷	٪ ۸/۴	٪ ۲/۹۱	٪ ۷/۸۴	٪ ۱۶/۱	٪ ۱۰/۲	٪ ۳/۹۲	٪ ۲۶/۴	٪ ۲۰/۸
ماسه+۶۰٪ بنتونیت	٪ ۱۰/۶	٪ ۷/۲۳	٪ ۳/۰۱	٪ ۶/۳۸	٪ ۱۲/۵	٪ ۸/۰۴	٪ ۸/۵۱	٪ ۲۶/۹	٪ ۲۲/۶
مدت زمان عمل آوری	۲۸ روزه								
ماسه	٪ ۲/۵۳	٪ ۰	–۰٪/۸۷	٪ ۱/۲۶	٪ ۵/۸۴	–٪ ۷/۴۲	٪ ۱/۲۶	٪ ۵/۸۴	–٪ ۸/۲۹
ماسه+۱۵٪ بنتونیت	٪ ۵۰/۵	٪ ۲۶/۴	٪ ۱۷/۳	٪ ۵۸/۴	٪ ۳۸/۰۳	٪ ۲۸/۸	٪ ۷۰/۳	٪ ۴۸/۵	٪ ۳۸/۶
ماسه+ ۳۰٪ بنتونیت	٪ ۵۷/۸	٪ ۳۱/۶	٪ ۲۱/۸	٪ ۶۵/۷	٪ ۴۳/۲	٪ ۳۳/۵	٪ ۷۰/۶	٪ ۴۸/۳	٪ ۳۸/۳
ماسه+۶۰٪ بنتونیت	٪ ۴۳/۱	٪ ۲۹/۶	٪ ۲۱/۱	٪ ۴۶/۸	٪ ۳۶/۱	٪ ۲۷/۶	٪ ۶۰/۵	٪ ۴۹/۳	٪ ۴۰/۷

جدول ۶ میزان تاثیر ذرات نانو سیمان بر مقاومت برشی نمونه‌های مورد مطالعه در مقایسه با حالت تثبیت نشده- شرایط بارگذاری اشباع

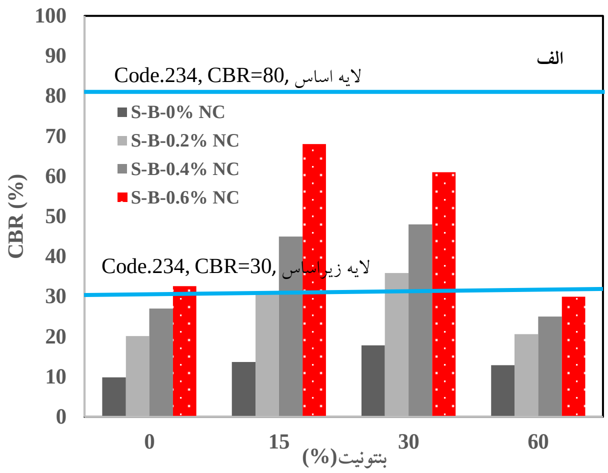
مدت زمان عمل آوری	۱روزه								
نمونه	۰/۲ ٪ نانو سیمان			۰/۴ ٪ نانو سیمان			۰/۶ ٪ نانو سیمان		
بار (kG/cm2)	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
ماسه	٪ ۲/۸۹	٪ ۰	-٪ ۰/۹۸	٪ ۰	-٪ ۳/۶۷	-٪ ۴/۹۲	-٪ ۲/۸۹	-٪ ۸/۰۸	-٪ ۹/۸۵
ماسه+۱۵٪ بنتونیت	٪ ۵/۱۲	٪ ۲/۳۸	٪ ۱/۱۴	٪ ۵/۱۲	٪ ۰	-٪ ۲/۲۹	٪ ۱۱/۵	٪ ۲/۳۸	-٪ ۱/۷۲
ماسه+ ۳۰٪ بنتونیت	٪ ۶/۳۲	٪ ۲/۴۷	٪ ۰/۶۱	٪ ۸/۸۶	٪ ۰/۸۲	-٪ ۳/۰۶	٪ ۱۵/۲	٪ ۱/۶۵	-٪ ۴/۹۰
ماسه+۶۰٪ بنتونیت	٪ ۱/۳۵	-٪ ۲/۷۷	-٪ ۴/۹۲	٪ ۴/۰۵	-٪ ۱/۸۵	-٪ ۴/۹۲	٪ ۸/۱	-٪ ۲/۷۷	-٪ ۸/۴۵
مدت زمان عمل آوری	۷ روزه								
ماسه	٪ ۰	٪ ۴/۸	٪ ۷/۰۴	٪ ۱/۴۴	٪ ۷/۲	٪ ۹/۸۵	٪ ۵/۷۹	٪ ۸/۸	٪ ۱۲/۶
ماسه+۱۵٪ بنتونیت	٪ ۱۴/۱	٪ ۱۴/۳	٪ ۳/۸۲	٪ ۳۴/۶	٪ ۱۵/۸	٪ ۸/۱۹	٪ ۴۱/۰۲	٪ ۲۰/۶	٪ ۱۰/۹
ماسه+ ۳۰٪ بنتونیت	٪ ۱۳/۹	٪ ۱۱/۶	٪ ۸/۰۴	٪ ۲۶/۵	٪ ۱۴/۰۴	٪ ۱۰/۹	٪ ۳۱/۶	٪ ۱۵/۷	٪ ۱۱/۵
ماسه+۶۰٪ بنتونیت	٪ ۲۷/۰۲	٪ ۱۳/۸	٪ ۳/۰۶	٪ ۳۵/۱	٪ ۱۴/۸	٪ ۵/۵۲	٪ ۳۷/۸	٪ ۱۹/۴	٪ ۹/۸۱
مدت زمان عمل آوری	۲۸ روزه								
ماسه	٪ ۱۱/۱	٪ ۱۳/۸۸	٪ ۲۶/۷	٪ ۱۵/۸	٪ ۲۱/۲	٪ ۳۵/۹	٪ ۲۶/۹	٪ ۲۴/۰۷	٪ ۳۹/۴
ماسه+۱۵٪ بنتونیت	٪ ۴۸/۶	٪ ۲۰/۵	٪ ۶/۸۹	٪ ۶۰/۸	٪ ۲۷/۲	٪ ۸/۸۶	٪ ۶۴/۸	٪ ۳۱/۶	٪ ۱۸/۲
ماسه+ ۳۰٪ بنتونیت	٪ ۵۳/۸	٪ ۲۲/۲	٪ ۹/۱۹	٪ ۶۰/۲	٪ ۲۹/۳	٪ ۱۴/۹	٪ ۶۶/۶	٪ ۳۴/۹	٪ ۲۰/۶
ماسه+۶۰٪ بنتونیت	٪ ۴۶/۸	٪ ۲۰/۶	٪ ۷/۳۶	٪ ۵۳/۱	٪ ۲۹/۷	٪ ۹/۲	٪ ۶۴/۵	٪ ۳۴/۷	٪ ۱۵/۳

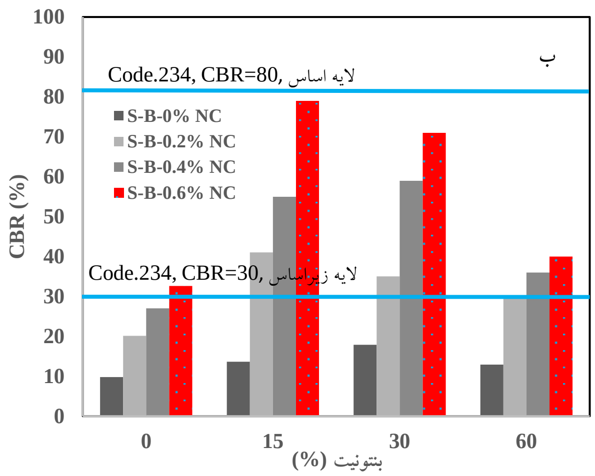
نتایج حاصل از آزمایش نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

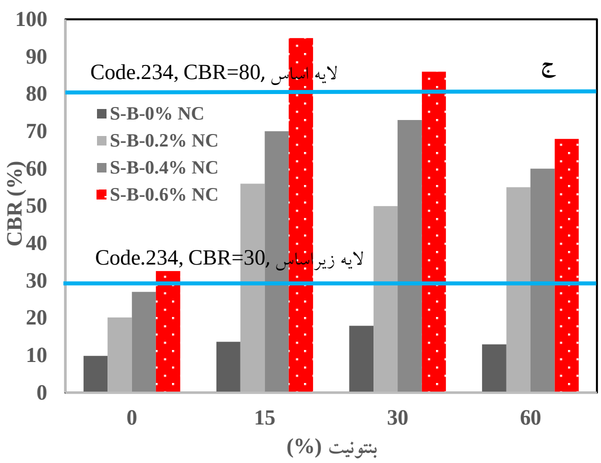
آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)، در حالت خشک و در انرژی تراکمی ۵۶ ضربه برای هر لایه بر روی نمونه‌های مخلوط ماسه بادی- بنتونیت حاوی ذرات نانو سیمان در شرایط عمل آوری شده انجام گردید. میزان نفوذ پیستون به مقدار ۲ اینچ (۵ سانتیمتر) اندازه گیری شده و نتایج طبق نمودارهای شکل(۱۷) قابل مشاهده می‌باشد. طبق نمودارهای شکل(۱۷-الف) می‌توان بیان نمود، درمدت زمان عمل آوری ۱ روزه، توانایی باربری تمام نمونه‌های ماسه بادی تا ۳۰ درصد بنتونیت و حاوی ۰/۶ درصد نانو سیمان بگونه‌ای است که طبق نشریه ۲۳۴ سازمان برنامه و بودجه جمهوری اسلامی ایران امکان استفاده از مصالح تثبیت شده را برای لایه های زیر اساس فراهم می‌آورد. اگرچه عدد نسبت بابری کالیفرنیا مخلوط ماسه بادی-بنتونیت همراه با ۰/۶ درصد نانو سیمان در مقایسه با مصالح مخلوط دیگر دارای بیشترین مقدار است. همانطورکه در شکل (۱۷-ب) ارائه شده، در مدت زمان عمل آوری ۷ روزه توانایی بابری تمامی نمونه‌های مورد مطالعه دارای ۰/۶ درصد نانو سیمان افزایش یافته و طبق نشریه ۲۳۴ امکان استفاده از آنها در ساخت لایه زیراساس وجود دارد. در ادامه با توجه به شکل (۱۷-ج) می‌توان بیان نمود، پس عمل آوری ۲۸ روزه ماسه بادی به همراه ۱۵ درصد بنتونیت که ۰/۶ درصد نانو سیمان به آن افزوده شده است دارای بیشترین عدد نسبت باربری کالیفرنیا بوده و طبق نشریه ۲۳۴ می‌توان از آن برای احداث لایه اساس در بدنه راه بکار برد.

نتایج بدست آمده براساس آزمون‌های انجام یافته که در بخش‌های گذشته به آن اشاره گردید را می‌توان براساس مقادیر نسبت تخلخل حداقل (e_{min})، نسبت تخلخل دانه‌ای(e_s) (رابطه ۱) و نسبت تخلخل بین دانه‌ای (e_f) (رابطه ۲) توضیح داد. همانطورکه تغییرات نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) در نمونه‌های مورد مطالعه با گذراندن مدت زمان‌های عمل آوری در نمودارهای شکل (۱۸-الف، ب و ج) قابل مشاهده می‌باشد می-توان دریافت، در تمامی زمان‌های عمل آوری، در خاک ماسه بادی با ۱۵ درصد رس بنتونیت میزان نسبت تخلخل حداقل کاسته شده و پس از آن با بالا رفتن درصد بنتونیت در ماسه بادی فضای خالی بین ذرات خاک مخلوط افزایش یافته و مقدار e_{min} روند صعودی را طی می‌نماید که بیان کننده شرایط سست در

ساختار اسکلتی دانه بندی مخلوط است. پس از آنکه ذرات نانو سیمان به نمونه‌ها افزوده می‌شود، در شکل (۱۸-الف) مشاهده می‌شود، در زمان عمل آوری یک روزه، حضور نانو سیمان در تمامی نمونه‌ها سبب افزایش مقدار فضای خالی بین ذرات شده است. در ادامه، طبق نمودارهای شکل (۱۸-ب) دیده شده است مدت زمان عمل آوری ۷ روزه بر ساختار دانه بندی و اسکلت خاک تاثیر گذار بوده و با افزودن نانو سیمان به نمونه‌ها و در اثر ایجاد واکنش سمنتاسیون بین ذارت، فضای خالی بین آنها کاهش یافته است. بطوریکه در مخلوط ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت به همراه ۰/۶ درصد نانو سیمان مقدار نسبت تخلخل حداقل تا ۱۸ درصد کاهش یافته است. با توجه به نمودارهای شکل (۱۸-ج) بعد از عمل آوری ۲۸ روزه، مشاهده می‌گردد با افزایش حضور ذرات نانو سیمان تغییرات شدید در ساختار و بافت خاک-های مخلوط به علت واکنش سمنتاسیون بوقوع پیوسته و بیشترین کاهندگی در فضای خالی بین ذرات نمونه مخلوط ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت همراه با ۰/۶ درصد نانو سیمان اتفاق افتاده است و میزان نسبت تخلخل حداقل به مقدار ۳۹ درصد کاهش یافته است. این شرایط سبب شده است از نقطه نظر خصوصیات ژئوتکنیکی بدلیل آنکه با کاهش فضای خالی بین ذرات و ایجاد استخوان بندی جدید و قوی بدلیل واکنش سمنتاسیون و افزایش سطح تماس بین آنها، مخلوط ماسه بادی با ۱۵درصد بنتونیت به همراه ۰/۶ درصد نانو سیمان بعد از ۲۸ روز عمل آوری دارای توانایی باربری مناسبی باشد.

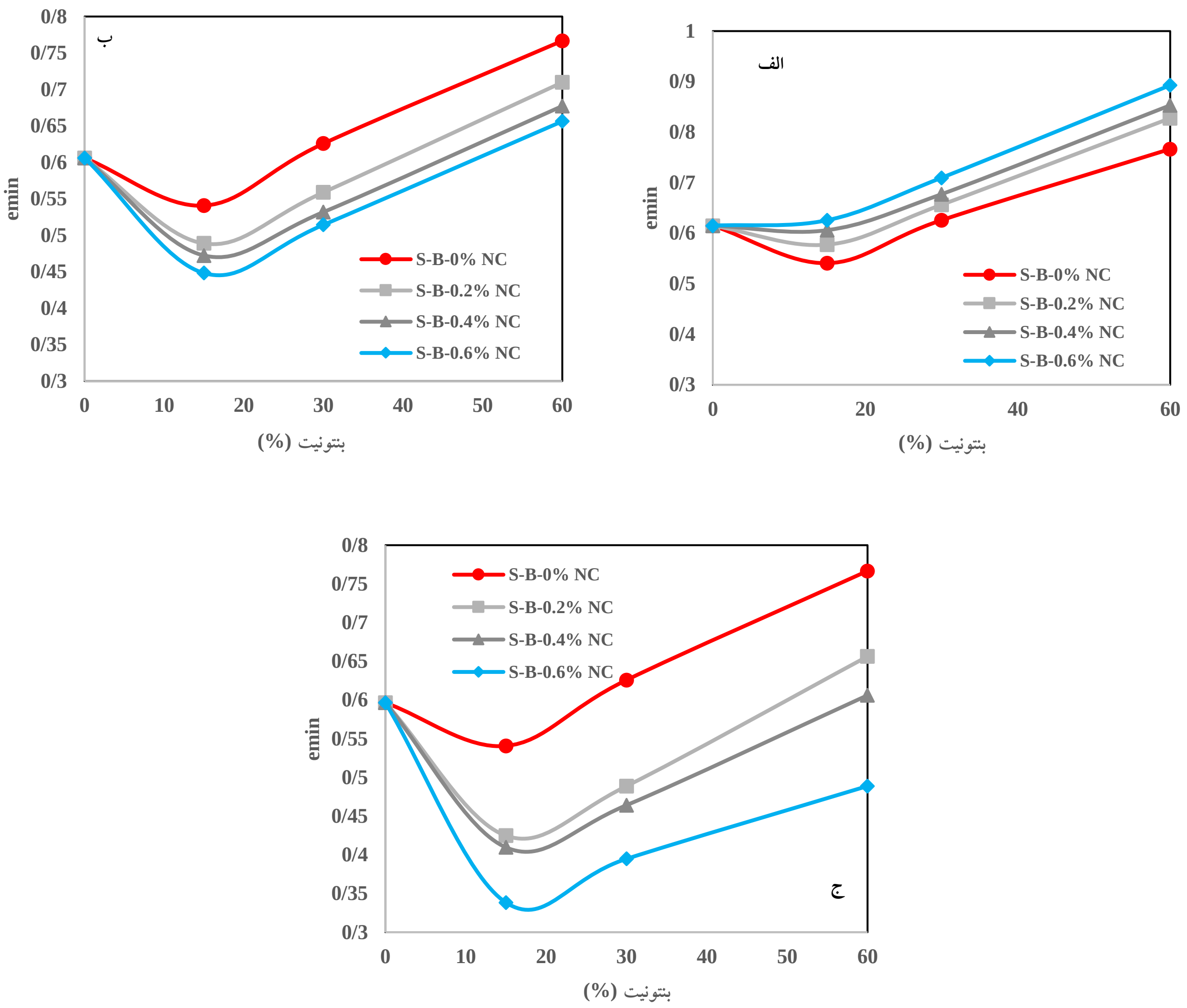






شکل ۱۷ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی نتایج آزمون نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) نمونه‌های مورد مطالعه در حالت خشک و در انرژی تراکمی ۵۶ ضربه برای هر لایه در مدت زمان عمل آوری مختلف، (الف) ۱ روزه، (ب) ۷ روزه، (ج) ۲۸ روزه

شرایط ذکر شده فوق با توجه به نتایج تغییرات نسبت تخلخل حداقل دانه‌ای (e_s) قابل تایید است. همانگونه که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، در مدت زمان عمل آوری یک روزه، زمانیکه به نمونه‌های خاکی مورد مطالعه نانو سیمان افزوده می‌شود نسبت تخلخل دانه‌ای (e_s) با بالا رفتن درصد ریزدانه افزایش یافته است که بیان کننده افزایش فضای خالی بین ذرات و سست شدن ساختار و ماتریس ذرات خاک است. در گام بعدی، با افزایش زمان عمل آوری به ۷ روز، با بالا رفتن مقدار درصد ریزدانه نسبت تخلخل دانه‌ای افزایش می‌یابد، از سوی دیگر، هنگامیکه نانو سیمان با نمونه‌ها مخلوط می شود یک روند کاهندگی در فضای خالی بین ذرات بوقوع می‌پیوندد که بیان کننده تماس بیشتر بین ذرات و به تبع آن افزایش سطح اصطکاک بین آنها است. در انتها، در مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه عمل آوری دیده می‌شود، واکنش سمنتاسیون بین ذرات ماسه بادی، بنتونیت و نانو سیمان تکمیل شده و با ایجاد یک ساختار و ماتریس اسکلتی قوی فضای بین ذرات کاسته شده است. این روند برای نمونه خاکی مخلوط ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت به همراه ۰/۶ درصد نانو سیمان بطور واضح قابل مشاهده است.



شکل ۱۸ تاثیر ذرات نانو سیمان بر روی مقادیر نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) نمونه های مورد مطالعه در مدت زمان عمل آوری مختلف، (الف) ۱ روزه، (ب) ۷ روزه، (ج) ۲۸ روزه

جدول ۷ تاثیر درصد بنتونیت و میزان ذرات نانو سیمان بر روی نسبت تخلخل دانه ای (e_s) و نسبت تخلخل بین دانه ای (e_f)

مدت زمان عمل آوری	۱روزه								
نمونه	۰/۲ ٪ نانو سیمان			۰/۴ ٪ نانو سیمان			۰/۶ ٪ نانو سیمان		
نسبت تخلخل	e_{min}	e_s	e_f	e_{min}	e_s	e_f	e_{min}	e_s	e_f
ماسه	۰/۶۱۵	۰/۶۱۵	–	۰/۶۱۵	۰/۶۱۵	–	۰/۶۱۵	۰/۶۱۵	–
ماسه+۱۵٪ بنتونیت	۰/۵۷	۰/۸۵	–	۰/۶	۰/۸۸	–	۰/۶۲	۰/۹	–
ماسه+ ۳۰٪ بنتونیت	۰/۶۵	۱/۳۶	–	۰/۶۷	۱/۳۸	–	۰/۷	۱/۴۳	–
ماسه+۶۰٪ بنتونیت	۰/۸۲	–	۱/۳۷	۰/۸۵	–	۱/۴۲	۰/۸۹	–	۱/۴۸
مدت زمان عمل آوری	۷ روزه								
ماسه	۰/۶۰۶	۰/۶۰۶	–	۰/۶۰۶	۰/۶۰۶	–	۰/۶۰۶	۰/۶۰۶	–
ماسه+۱۵٪ بنتونیت	۰/۴۹	۰/۷۵	–	۰/۴۷	۰/۷۳	–	۰/۴۴	۰/۶۹	–
ماسه+ ۳۰٪ بنتونیت	۰/۵۵	۱/۲۱	–	۰/۵۳	۱/۱۸	–	۰/۵۱	۱/۱۶	–
ماسه+۶۰٪ بنتونیت	۰/۷۱	–	۱/۱۸	۰/۶۷	–	۱/۱۲	۰/۶۵	–	۱/۰۸
مدت زمان عمل آوری	۲۸ روزه								
ماسه	۰/۵۹۶	۰/۶۰۶	–	۰/۵۹۶	۰/۶۰۶	–	۰/۵۹۶	۰/۶۰۶	–
ماسه+۱۵٪ بنتونیت	۰/۴۲	۰/۶۷	–	۰/۴۱	۰/۶۶	–	۰/۳۳	۰/۵۶	–
ماسه+ ۳۰٪ بنتونیت	۰/۴۹	۱/۱۳	–	۰/۴۶	۱/۰۸	–	۰/۳۹	۰/۹۸	–
ماسه+۶۰٪ بنتونیت	۰/۶۵	–	۱/۰۸	۰/۶	–	۱	۰/۴۹	–	۰/۸۲

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

همانطورکه در بخش‌های گذشته به آن اشاره گردید هدف اصلی از تحقیق حاضر، امکان تثبیت خاک‌های نرم و سست جهت انجام پروژه‌های عمرانی، ساختمانی و ابنیه‌های ژئوتکنیکی می‌باشد. بدین منظور، به مخلوط خاک ماسه بادی- رس بنتونیت (با درصدهای ۱۵، ۳۰ و ۶۰) ذرات نانو سیمان با مقادیر ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۶ درصد وزنی اضافه شده و عمل آوری به مدت ۷، ۱۴ و ۲۸ روز بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفت. نتایج بدست آمده از مطالعه حاضر نشان می‌دهد بهینه ترین حالت، افزودن ۰/۶ درصد نانو سیمان به خاک مخلوط ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت در مدت زمان عمل آوری ۲۸ روز بوده و دلایل آن را می‌توان به شرح ذیل بیان نمود:

۱. مقدار وزن مخصوص خشک حداکثر مخلوط ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت با حضور ۰/۶ درصد نانو سیمان در مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه ۲۱ درصد افزایش یافته است و رطوبت بهینه به میزان ۵۱ درصد کاسته شده است.

۲. مقاومت فشاری تک محوری بعد از مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه ۱/۸ برابر افزایش یافته و در همین شرایط مدول سکانت (E_{50})، ۱/۹۴ برابر بهبود نشان داده است. اگرچه، حضور ۰/۶ درصد نانو سیمان در خاک ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت باعث رفتار سخت و ترد شونده گردیده و کرنش برشی در لحظه گسیختگی در مدت زمان های عمل آوری مذکور ۳۳ درصد کاسته شده است.

۳. در شرایط بارگذاری خشک، زاویه اصطکاک داخلی در نمونه خاک ماسه بادی حاوی ۱۵ درصد بنتونیت به همراه ۰/۶ درصد نانو سیمان ۹ درصد افزایش یافته است. البته، در حالت اشباع افزایش مدت زمان عمل آوری بر روی تاثیر گذاری نانو سیمان در مخلوط ماسه-رس موثر نبوده و با افزایش مقدار نانو سیمان و بنتونیت در خاک ماسه بادی کاسته شده است.

۴. در هر دو شرایط بارگذاری خشک و اشباع با مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه، چسبندگی در نمونه‌های مورد مطالعه با مخلوط نمودن نانو سیمان افزایش می‌یابد. اگرچه حداکثر مقدار چسبندگی نیز در نمونه مخلوط ماسه بادی- بنتونیت همراه با ۰/۶ درصد نانو سیمان دیده می‌شود. نرخ رشد در شرایط بارگذاری خشک و حالت اشباع به ترتیب ۱/۱ و ۱۲/۱ برابر است.

۵. در شرایط بارگذاری خشک، میزان مقاومت برشی با حضور ۰/۶ درصد نانو سیمان در نمونه مخلوط ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت با مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه در تمامی مقادیر تنش‌های قائم بطور میانگین ۵۲/۵ درصد افزایش یافته است. همانطور در شرایط بارگذاری اشباع، مقاومت برشی در نمونه‌های مخلوط ماسه بادی با ۳۰ درصد بنتونیت با مدت زمان عمل آوری ۲۸ روزه دیده می‌شود. میزان توانایی باربری بطور میانگین ۴۰/۷ درصد در تمامی مقادیر تنش قائم بالا رفته است.

۶. پس عمل آوری ۲۸ روزه، مخلوط ماسه به همراه ۱۵ درصد بنتونیت که حاوی ۰/۶ درصد نانو سیمان است دارای بیشترین عدد نسبت باربری کالیفرنیا بوده و طبق نشریه ۲۳۴ می‌توان از آن برای احداث تمامی لایه‌های روسازی و بویژه لایه اساس در بدنه راه بکار برد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت، در محل-هایی که مسیر عبور می‌کند دارای خاک ریزدانه با خاصیت خمیری بالا باشد، از نانو سیمان می توان برای تثبیت و احداث لایه‌های روسازی استفاده نمود.

نتایج بدست آمده را می‌توان با توجه به مقادیر نسبت تخلخل حداقل (e_{min}) بیان نمود. بدین ترتیب که حضور بیش از ۱۵ درصد بنتونیت در خاک ماسه بادی بدلیل بالا بودن مقدار فضای خالی بین ذرات باعث بوجود آمدن یک ساختار اسکلتی سست می‌گردد و همانطور که در جدول (۷) ارائه شده مقدار e_{min} افزایش می‌یابد. زمانیکه نانو سیمان به نمونه‌ها افزوده می‌گردد مشاهده می‌شود با افزایش زمان عمل آوری به ۲۸ روز و انجام واکنش سمنتاسیون بین ذرات خاکی، یک سری ذرات دانه‌ای جدید به همراه ساختار اسکلتی با استخوان بندی تازه ایجاد می-گردد. این شرایط برای مخلوط ماسه بادی به همراه ۱۵ درصد بنتونیت و با ترکیب ۰/۶ درصد نانو سیمان بوضوح قابل مشاهده است. بطوریکه میزان نسبت تخلخل حداقل به مقدار ۳۹ درصد کاهش می‌یابد. این شرایط با توجه به نتایج تغییرات نسبت تخلخل حداقل دانه‌ای نیز (e_s) قابل تایید می‌باشد. بنابراین این روند بیان کننده آن است اصطکاک و سطح تماس بین ذرات افزایش یافته که نتیجه بالا رفتن توانایی باربری و کاهش میزان احتمال وقوع نشست و تغییر شکل در بین ذرات خاک بوده و در نتیجه از مخلوط ماسه بادی با ۱۵ درصد بنتونیت به همراه ۰/۶ درصد نانو سیمان برای ساخت ابنیه‌های ژئوتکنیکی و لایه‌های روسازی راه می توان استفاده نمود. البته لازم به یاد آوری است در مطالعه حاضر، تاثیر نانو سیمان بر روی خصوصیات تورمی و افزایش حجم بنتونیت در شرایط اشباع کامل مدنظر قرار نگرفته است و در تحقیقات آتی بررسی خواهد شد.

واژه نامه

انجمن آزمایش و مواد آمریکا	ASTM
اسید اولئیک	Oleic acid
نسبت تخلخل	e
نسبت تخلخل دانه‌ای	e_s
نسبت تخلخل بین دانه‌ای	e_f
بنتونیت	Bentonite
ماسه بادی	Dune sand
مدول سکانت(E_{50})	Secant modulus (E_{50})
نسبت باربری کالیفرنیا(CBR)	California bearin ratio

سپاسگزاری

مراجع

[1] S. Thevanayagam, “Liquefaction Potential and Undrained Fragility of Silty Soils, *Proc. of 12th World Conference on Earthquake, Auckland*, New Zealand, pp.8-20, (1999), https://api.semanticscholar.org/CorpusID:195734798

[2] M. R. Noll, C. Bartlett C, T. M. Dochat, “In Situ Permeability Reduction and Chemical Fixation Using Colloidal Silica”, *In Proceedings of the Sixth National Outdoor Action Conference on Aquifer Restoration*, Ground Water Monitoring, and Geophysical Method, State College, PA, USA, 11–13 May 1992; National Ground Water Association: Westerville, OH, USA, (1992).

[3] R. Yonekura, M. Miwa, “Fundamental Properties of Sodium Silicate Based Grout”, *In Proceedings of the 11th*

Southeast Asia Geotechnical Conference, Singapore, vol. 439, pp.439-444, (1993).

[4] Gh. Moradi, Sh. Seyyedi, "Evaluation of Effective Strength Parameters and Micro Structural Variations of Silty Sands Stabilized with Nano Colloidal Silica," *Journal Management System*, vol. 46.4, no. 85, pp.77-88.

[5] A. Kakavand, R. Dabiri, "Experimental study of applying colloidal Nano Silica in improving sand-silt mixtures," *International Journal of Nano Dimension*, vol. 9, no. 4, pp. 357-373, (2018).

[6] V. Pourvahedi, V. Pourahmadi, M. Arbani, "Laboratory study of improving the geotechnical properties of clay using nano particles," *1st National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Shahid Rajaee University*, Tehran, Iran, pp.1-8, (2014). (In Persian), https://civilica.com/doc/332591/

[7] Bahari M.; Shahnazari A.; "Laboratory investigation of fine-grained soil bed stabilization using nano clay," *Journal of water and soil science*, vol.19, no.72, pp.107-113, (2015), http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.72.10

[8] Z. Fakhri, R. Pourhosseini, T. Ebadi T.; "Improvement in the Hydraulic Properties of Kaolinite with Adding Nanoclay," *Amirkabir journal of civil engineering*, vol. 47, no.3, pp.39-46, (2016).

[9] N. Abbasi, A. Farjad, "Application of Nano-clay particles for stabilization of dispersive clayey soils", *Iranian Journal of Soil and Water Research*, vol. 48, no. 3, pp.515-524, (2017).

[10] M. Raihan. Taha, O. M. E Taha, "Influence of Nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior," *Journal of Nanoparticle Research*, vol.14, no.10, p. 1190, (2012).

[11] M. Mohammadi, M. Niazian, "Investigation of Nano-clay effect on geotechnical properties of Rasht clay," *International Journal of Advanced Scientific and Technical Research*, vol. 3, no. 3, pp. 37-46, (2013).

[12] S. Ghaffari S, R. Dabiri R, "Study of Nano-clay and Limestone Powder Effects on the Geotechnical Properties of Clayey Soil of Eastern Tabriz," *Journal of engineering geology*, vol. 15, no. 3, pp. 455-479, (2021).

[13] S. Ghaffari, R. Dabiri, "Effects of Applying Nano Clay Particles and Polypropylene Fibers on Geotechnical Properties of Clayey Soil for using in Pavement Layers", *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 587-608, (2021).

[14] A. Bagheri, H. Zanganeh, M. R. Samani and M. Abolhassani, "The effect of the type, dimensions, and percentage of nano silica consumption on the properties of cement mortar," *First International Concerete Conference*, National Center for Retrofitting (Northwest Branch), pp.1-7, (2009). (In Persian)

[15] V. Chaudhary, J. Singh Yadav, R. Kumar Dutta, "Impact of Nano-Silica and Cement on Geotechnical Properties of Bentonite Soil", *Indian geotechnical journal*, vol. 24, p. 133889, (2023).

[17] H. Niroumand, L. Balachowski, R. Parviz, "Nano soil improvement technique using cement", *Sceintific report*, vol.13, p. 10724, (2023).

[18] Iran China Clay Industries Company, https://icckaolin.com/en/home/

[19] ASTM D421-85, "Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants (Reapproved 2002)," *Annual book of ASTM standards*, (1985)

[20] ASTM D422-63, "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Reapproved 2002)," vol. 04.08, p. 8, *Annual book of ASTM standards*, (1963).

[21] ASTM D 854-23, “Standard test method for specific gravity of soil solids by the water Displacement Method,” *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.08, p. 9, (2023).

[22] ASTM D 4318-95e1, “Standard test method for liquid limit, plastic limit and plasticity index for soils,” *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.08, p. 20, (1995).

[23] ASTM C618-19, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Concrete,” *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.02, p. 3, (2019).

[24] ASTM C305-20, “Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency,” *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.01, p. 3, (2020).

[25] ASTM D 698-12, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft^3 (600 kN-m/m^3)) (Reapproved 2021),” *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.08, p. 13, (2012).

[26] ASTM D2166/ D2166M-16, “Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil,” *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.08, p. 7, (2016).

[27] ASTM D3080/ D3080M-23, “Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils under Consolidated Drained Conditions,” *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.08, p. 9, (2023).

[28] ASTM D1883-21, “Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory- compacted soils,” *Annual book of ASTM standards*, vol. 04.08, p. 16, (2021).